



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA IMPLEMENTAÇÃO DE
UM SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO NA ILUMINAÇÃO**

Rafael Augusto Royer

Lajeado, 16 de Novembro de 2020.

Rafael Augusto Royer

ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO NA ILUMINAÇÃO

Projeto de Monografia apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Elétrica, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Msc. Yuri Solis Stypulkowski.

Lajeado, 16 de Novembro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar um agradecimento especial para todos que de uma forma ou de outra se fizeram presentes durante estes anos de estudo, trabalho e dedicação à Engenharia Elétrica, aos meus pais e familiares, à minha namorada, professores, colegas e amigos.

RESUMO

Uma das formas de energia mais presentes no cotidiano é a luz, energia em forma luminosa. Para atender as necessidades humanas, as lâmpadas foram criadas e aperfeiçoadas, ficando cada vez mais eficientes no processo de transformação de energia elétrica em energia radiante. Contudo, apesar dos avanços tecnológicos e ganhos em eficiência, muitas vezes este tipo de carga tem seu uso negligenciado, em função de apresentar baixo consumo unitário de energia. Diante deste cenário, é pertinente a busca por ferramentas para efetuar controle destas pequenas cargas, visando tornar mais eficiente o seu uso. No caso abordado ao longo deste trabalho de monografia, utilizou-se um sistema de controle automatizado, buscando evitar o desperdício de energia, atendendo o limite mínimo de iluminância para o ambiente e acionando somente o número de luminárias necessário. Através deste sistema proposto, objetiva-se reduzir o consumo de energia elétrica e com isso, tornar o uso da iluminação mais eficiente.

Palavras-chave: Controle, eficiência energética, iluminação.

ABSTRACT

One of the most present forms of energy in everyday life is light, energy in a luminous form. To meet human needs, the lamps were created and improved, becoming increasingly efficient in the process of transforming electrical energy into radiant energy. However, despite technological advances and gains in efficiency, this type of charge is often neglected, due to its low unit energy consumption. Given this scenario, it is pertinent to search for tools to control these small charges, aiming at making their use more efficient. In the case addressed throughout this monograph work, an automated control system was used, seeking to avoid wasting energy, meeting the minimum illuminance limit for the environment and activating only the number of luminaires needed. Through this proposed system, the objective is to reduce the consumption of electricity and thereby make the use of lighting more efficient.

Keywords: Control, energy efficiency, illumination.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplos de conversão entre seis formas de energia	16
Figura 2 - Propagação do campo elétrico, magnético e radiação eletromagnética ...	22
Figura 3 - Diferença entre iluminância e luminância.....	24
Figura 4 - Lâmpadas tubulares comerciais <i>LED</i> e fluorescente	27
Figura 5 - Componentes de uma lâmpada fluorescente tubular.....	28
Figura 6 - Funcionamento de um reator eletrônico.....	30
Figura 7 - Dopagem para formação do elemento tipo P e N.....	31
Figura 8 - Componentes de uma lâmpada <i>LED</i>	32
Figura 9 - Diagrama de blocos de sistema de controle de malha aberta	34
Figura 10 - Diagrama de blocos de sistema de controle de malha fechada.....	35
Figura 11 - Atuação de controle <i>ON-OFF</i>	36
Figura 12 - Histerese na atuação do sistema de controle <i>ON-OFF</i>	37
Figura 13 - Topologia típica de um microcontrolador	38
Figura 14 - Simbologia e aspecto do sensor <i>LDR (Light Dependent Resistor)</i>	39
Figura 15 - Esquema de funcionamento de um relé.....	40
Figura 16 - Planta baixa do laboratório de eletrônica	42
Figura 17 - Imagens do laboratório onde o trabalho foi desenvolvido	42
Figura 18 - Luminária Intral LS-812 e curva de distribuição luminosa.....	43
Figura 19 - Luxímetro digital minipa utilizado nas medições de iluminância	44
Figura 20 - Pontos para medição de iluminância do laboratório de eletrônica	45
Figura 21 - Programador horário instalado para o acionamento da iluminação do laboratório	46
Figura 22 - Analisador de energia <i>PowerNET PQ700 G4</i>	47
Figura 23 - Posição de instalação do analisador de grandezas elétricas.....	48
Figura 24 - Lâmpada tubular <i>LED</i> utilizada no projeto	49
Figura 25 - Topologia da malha de controle proposta.....	50
Figura 26 - Microcontrolador Atmega238 na plataforma do Arduino Uno R3.....	52

Figura 27 - Módulo de relé utilizado para o chaveamento das lâmpadas	53
Figura 28 - Módulo do sensor <i>LDR</i> para medição da luminosidade.....	53
Figura 29 - Disposição dos sensores e luminárias de acordo com referência do controle	55
Figura 30 - Posição dos componentes do sistema de controle automatizado.....	56
Figura 31 - Quadro de comando implementado para o controle automatizado do sistema de iluminação... ..	57
Figura 32 - Adaptação realizada em módulo de sensores <i>LDR</i> para fixá-lo em perfilado existente.....	58
Figura 33 - Gráfico do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação antigo em um período de vinte e quatro horas.....	61
Figura 34 - Gráfico do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação antigo em um período de quatro horas	61
Figura 35 - Gráfico do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação com lâmpadas <i>LED</i> em um período de vinte e quatro horas	64
Figura 36 - Gráfico do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação com lâmpadas <i>LED</i> e controle automatizado em um período de vinte e quatro horas	68
Figura 37 - Gráfico do Comportamento da potência da carga no período de uma semana	68
Figura 38 - Gráfico comparativo do comportamento da carga para as diferentes etapas da implementação do sistema de controle automatizado da iluminação	72
Figura 39 - Gráfico de análise dos aspectos econômicos na implementação de um sistema de iluminação novo	75
Figura 40 - Gráfico de análise dos aspectos econômicos nas intervenções realizadas em um sistema de iluminação	78
Figura 41 - Gráfico de análise dos aspectos econômicos na implementação do controle automatizado em um sistema de iluminação com <i>LED</i>	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Alguns requisitos da ISO 50001 e seus principais benefícios	20
Tabela 2 - Valores médios de iluminância do sistema de iluminação anterior a troca das lâmpadas	59
Tabela 3 - Valores médios de iluminância do sistema de iluminação posterior a troca das lâmpadas por <i>LED</i>	62
Tabela 4 - Comparativo entre os sistemas de iluminação do ambiente analisados com as diferentes tecnologias de lâmpadas	65
Tabela 5 - Valores médios de iluminância do sistema de iluminação em cada turno programado posterior a implementação do controle automatizado.....	67
Tabela 6 - Consumo de energia elétrica do sistema de iluminação e média da potência da carga para os diferentes períodos de acionamento.....	69
Tabela 7 - Média da potência da carga, iluminância e eficiências para os diferentes períodos de acionamento do sistema de iluminação.....	70
Tabela 8 - Comparativo entre as três diferentes etapas da implementação do sistema automatizado de iluminação do ambiente analisado	70
Tabela 9 - Especificações técnicas e custos iniciais de instalação de cada sistema de iluminação analisado	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 Objetivo Geral	7
1.2 Objetivos Específicos.....	8
1.3 Descrição dos Capítulos	8
2 REVISÃO TEÓRICA	10
2.1 Energia	10
2.1.1 Transformação de Energia	10
2.1.2 Energia Elétrica	11
2.1.3 Eficiência Energética	12
2.1.4 Normas ISO 50001 e IEC 60364-8-1	14
2.3 Iluminação	16
2.3.1 Energia Luminosa.....	16
2.3.2 Luminotécnica	18
2.3.2.1 Fluxo Luminoso	18
2.3.2.2 Intensidade Luminosa	18
2.3.2.3 Iluminância	19
2.3.2.4 Luminância	19
2.3.2.5 Rendimento Luminoso	20
2.3.2.6 Temperatura de Cor	20
2.3.2.6 Índice de Reprodução de Cor	20
2.3.2.7 Norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013.....	21
2.3.3 Fontes de Iluminação Artificial	21
2.3.3.1 Lâmpada Fluorescente.....	22
2.3.3.2 Reatores de Lâmpadas Fluorescentes.....	24
2.3.3.3 Diodo Emissor de Luz (Light-Emitting Diode - LED)	25
2.3.3.4 Acionamento de LED's	27

2.4 Circuito de Controle	28
2.4.1 Controle em Malha Aberta.....	29
2.4.2 Controle em Malha Fechada	30
2.4.3 Ação de Controle ON-OFF (Liga-Desliga)	31
2.4.4 Microcontrolador	32
2.4.5 Sensor Fotoelétrico.....	33
2.4.6 Relés	34
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	35
3.1 Características do Ambiente	36
3.2 Características do Sistema de Iluminação Atual.....	37
3.2.1 Método de Medição de Iluminância	39
3.2.2 Método de Medição do Consumo	40
3.3 Características do Sistema de Iluminação Proposto.....	43
3.4 Implementação do Sistema de Controle	44
3.4.1 Controle Automatizado do Acionamento Através de um Microcontrolador	45
3.4.2 Chaveamento de Luminárias Utilizando Módulo de relés.....	47
3.4.3 Leitura da Iluminação via Módulo de Sensor LDR.....	47
3.4.4 Lógica de Controle de Acionamento Utilizada	48
3.4.4 Sistema de Controle Montado	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1 Análise do Sistema de Iluminação Antigo com Lâmpadas Fluorescentes	52
4.1.1 Iluminância do Sistema de iluminação com Lâmpadas Fluorescentes	53
4.1.2 Consumo do Sistema de Iluminação Existente com Lâmpadas Fluorescentes.....	54
4.2 Análise do Sistema de Iluminação Após Substituição das Lâmpadas Fluorescentes por LED	56
4.2.1 Iluminância do Sistema de iluminação com Lâmpadas LED	56
4.2.2 Consumo do Sistema de iluminação com Lâmpadas LED	58
4.3 Implementação do Sistema de Iluminação Automatizado	60
4.3.1 Iluminância do Sistema de iluminação Automatizado.....	60
4.3.2 Consumo do Sistema de iluminação Automatizado	61
4.4 Comparativo Entre os Sistema Analisados.....	65
4.5 Análise dos Aspectos Econômicos	66
4.5.1 Instalação de um Sistema Novo	68
4.5.1.1 Comparativo de Dados entre Fluorescente e LED	70
4.5.1.2 Comparativo de Dados entre Fluorescente e LED com Automação	70
4.5.2 Implementação em um Sistema Existente.....	71

4.5.2.1 Comparativo de Dados entre Fluorescente e LED	72
4.5.2.2 Comparativo de Dados entre Fluorescente e LED com Automação	73
4.5.3 Comparativo de Dados entre LED e LED com Automação	73
5 CONCLUSÃO	76
REFERÊNCIAS.....	79
APÊNDICES E ANEXOS.....	83
ANEXO A - TRECHO DA NORMA ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013	83
ANEXO B - ALGORITMO DE CONTROLE DA ILUMINAÇÃO DESENVOLVIDO NO ARDUINO IDE 1.8.13.....	84

1 INTRODUÇÃO

É impossível imaginar a vida sem a energia em sua forma radiante, a luz. A iluminação é um fator imprescindível em praticamente todos os ambientes, principalmente quando alguma atividade nele é exercida, podendo ser ela acadêmica, de atendimento, ou até mesmo doméstica. O sol, que é a nossa maior fonte de energia, nos proporciona a luz natural, que é fundamental para toda a vida na Terra. Porém, nem sempre a luz natural é suficiente para suprir a necessidade, e para isso as lâmpadas foram criadas, para iluminar artificialmente o ambiente. Contudo, a iluminação artificial nem sempre é utilizada de forma eficiente e sustentável (ALVES; LUIZ, 2013)

Além disso, a racionalização do consumo de energia como um todo, é essencial e, com isso, se torna relevante a criação de alternativas que busquem pela eficiência energética dos processos. Quando se pensa em eficiência energética, geralmente objetiva-se apenas “realizar mais com menos”. Porém, deve-se observar que somente “realizar mais” não é necessariamente uma atitude eficiente do ponto de vista energético. Deixar de considerar as perdas, ou desperdícios em um sistema, mesmo que este utilize recursos eficientes em seus processos, também torna-o ineficiente. Em um sistema de iluminação, isso ocorre com grande frequência.

Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), os sistemas de iluminação são responsáveis por aproximadamente 24% do consumo residencial (SANTOS *et. al.*, 2007). Estes sistemas são exemplos onde ocorre grande

desperdício energético, ou seja, quando a iluminação artificial é utilizada onde a luz natural já seria suficiente para atingir a iluminância adequada para a realização das atividades, conforme a norma ABNT NBR ISO/CIE 8995*1:2013. Sabendo disso, a automação surge como ferramenta para realizar o controle das fontes de iluminação artificial (ROSSETTI; EUGÊNIO, 2017).

Atualmente já existem tecnologias muito eficientes de lâmpadas, como por exemplo, as lâmpadas *LED (Light-Emitting Diode)*, no entanto, por serem mais recentes, alguns prédios ainda utilizam lâmpadas de descarga, também conhecidas como lâmpadas fluorescentes, que apesar de terem certa eficiência, dependem de um reator para seu funcionamento, e ainda podem ser consideradas defasadas quando comparadas às novas lâmpadas de diodo.

Além da eficiência das lâmpadas em si, o modo como os sistemas de iluminação são utilizados poderiam evoluir significativamente. Circuitos de iluminação - por apresentarem cargas unitárias (lâmpadas) com potências menos expressivas - são suscetíveis ao desperdício, ou seja, são utilizados sem real necessidade (SANTOS *et. al.*, 2007). Por isso, a busca por técnicas mais eficientes de controle da iluminação se mostra uma alternativa para gerar economia de energia elétrica, reduzindo desperdícios e promovendo o conforto do usuário.

1.1 Objetivo Geral

Este projeto de monografia tem como objetivo geral propor um sistema de controle inteligente que module a iluminação artificial de um ambiente, se adaptando com a iluminação natural e garantindo níveis mínimos de iluminância. Visando assim, reduzir o consumo de energia do sistema, a partir da redução do desperdício no uso da iluminação.

1.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste projeto de monografia:

- I. Substituir o sistema de iluminação antigo de um laboratório de uso acadêmico, por um sistema com lâmpadas mais eficientes;
- II. Realizar a medição da iluminância do ambiente, conferindo de esta encontra-se adequada, dentro das normas vigentes;
- III. Desenvolver e implementar um sistema de controle inteligente, que module a quantidade de lâmpadas ligadas, garantindo níveis de iluminância adequados, e sem desperdício energia;
- IV. Medir o consumo de energia elétrica do circuito de iluminação desta sala, e realizar diferentes comparativos para analisar os efeitos do controle sobre a energia consumida por este.
- V. Realizar o cálculo estimado do *payback* do sistema, objetivando verificar a viabilidade de implementação do sistema proposto.

1.3 Descrição dos Capítulos

No decorrer dos próximos capítulos serão abordados os seguintes temas: O CAPÍTULO 2, introduz os estudos através de uma Revisão Teórica, abordando conceitos sobre energia e eficiência energética, iluminação, grandezas luminotécnicas, além de normas vigentes e fontes de iluminação artificial. Por fim, apresenta os materiais e ferramentas definidos para a realização do controle automático. O CAPÍTULO 3, trata dos Procedimentos Metodológicos, que englobam as características ambientais, bem como a situação atual do sistema de iluminação, e o sistema proposto ao qual se deseja implementar. No CAPÍTULO 4, apresentam-se os Resultados e Discussões, onde são descritos os resultados das

análises realizadas nesta monografia, enquanto o CAPÍTULO 5 discorre sobre as Conclusões, e na sequência, são vistas as REFERÊNCIAS utilizadas no projeto. Ao final, o CAPÍTULO 6 é composto dos Apêndices e Anexos.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Energia

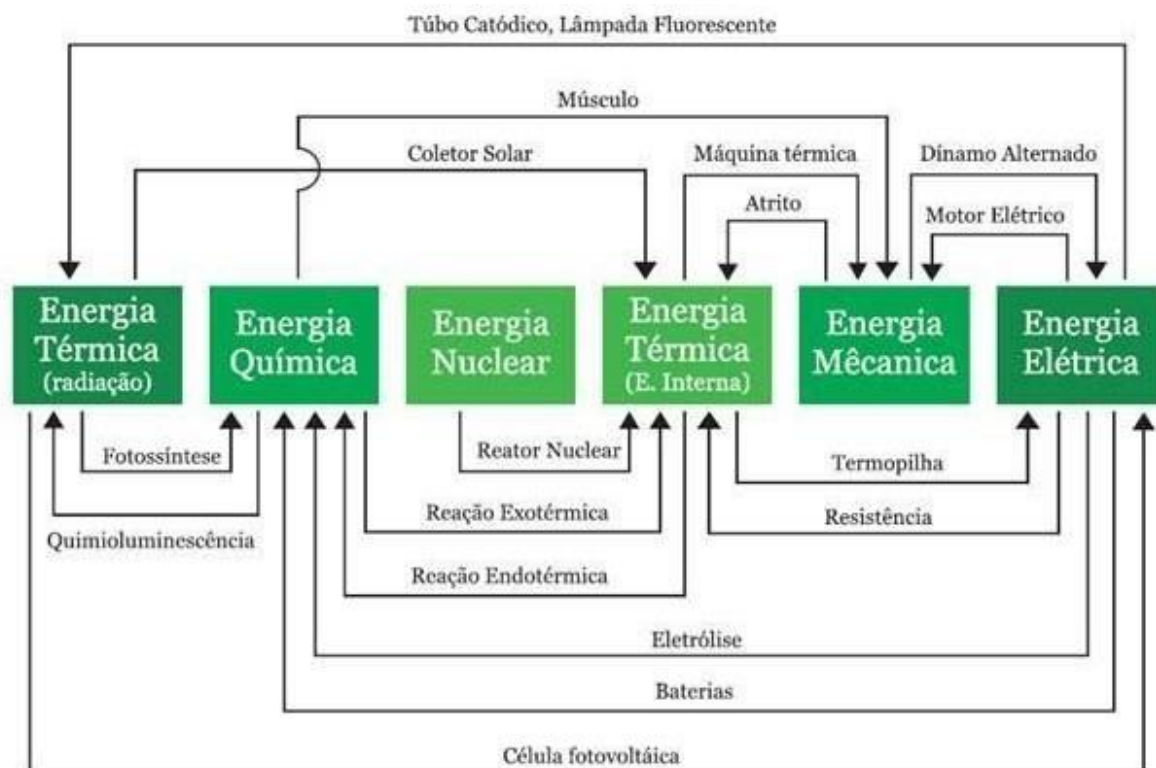
A energia, em poucas palavras, é descrita como a capacidade de realizar trabalho¹, seja ele qual for. Qualquer alteração no estado da matéria implica em um trabalho. Exemplos disso são: mover um objeto, aquecer um corpo, produzir luminosidade, entre outros. De certo modo, tudo o que acontece envolve trabalho, que só é possível graças à energia. A energia se apresenta de inúmeras formas, e exemplos destas são a eletricidade, o petróleo, o gás natural, a biomassa, etc. (ALVES; CLÁUDIO, 2009).

2.1.1 Transformação de Energia

Uma característica essencial da energia é a possibilidade de ser convertida, ou seja, uma forma de energia pode ser convertida em outra, permitindo se adequar a determinada aplicação. Um equívoco frequentemente cometido é empregar os termos “geração” ou “consumo” de energia, pois a rigor, trata-se de processos de “conversão de energia” (HADDAD *et. al.*, 2012). A imagem abaixo ilustra as diversas formas de conversão, sendo parte delas desenvolvidas e aperfeiçoadas pelo homem, e outras possíveis apenas mediante processos naturais.

¹ Trabalho é a energia transferida para um corpo ou de um corpo através de uma força que age sobre este mesmo. O Trabalho total executado sobre uma partícula é igual a variação de energia da partícula. Portanto, o trabalho é a energia transferida, ou seja, realizar trabalho é o ato de transferir energia (HALLIDAY, David, 2012, p. 147).

Figura 1 - Exemplos de conversão entre seis formas de energia.



Fonte: Adaptado em 24/08/2019 de Jamil Haddad *et. al.*, 2012.

Conforme o artigo “Eficiência energética em edifícios: Gestão do sistema iluminação”, (LOUÇANO; NELSON, 2009), um exemplo de transformação de energia é a luz artificial, que deve-se à transformação de energia em energia radiante. A partir da energia elétrica, é possível produzir luminosidade de duas formas, das quais se baseiam as diversas fontes luminosas utilizadas hoje em dia. Estas formas são a incandescência² e a luminescência³.

2.1.2 Energia Elétrica

A forma de energia mais presente na vida do ser humano, na atualidade, com exceção da energia proveniente dos raios solares, é a energia elétrica. A maior parte das atividades cotidianas depende direta ou indiretamente do uso da eletricidade.

² Incandescência é o processo onde a luminosidade é obtida pela agitação dos átomos do material através da indução de uma corrente elétrica (LOUÇANO; NELSON, 2009).

³ A luminescência consiste na emissão de radiação produzida por átomos de determinado material. Ela é resultado da excitação de átomos por diversas formas de energia (LOUÇANO; NELSON, 2009).

De acordo com o livro “Energia Elétrica: Conceitos, Qualidade e Tarifação”, publicado pelas Centrais Elétricas Brasileiras S.A (ELETROBRÁS) e pelo Programa Nacional de Conversação de Energia Elétrica (PROCEL) (HADDAD; JAMIL, 2004), foi Tales de Mileto, que perto de 600 A.C., percebeu ao esfregar âmbar, que ele passava a atrair corpos mais leves como, palha ou pedaços de poeira, e em seguida os largava espontaneamente, e denominou o fenômeno como eletricidade. E desde então o conhecimento da eletricidade foi se ampliando, e hoje a eletricidade é fundamental.

Ainda segundo o autor:

A eletricidade é uma forma de energia que pode ser imediata e eficientemente transformada em qualquer outra, tal como em energia térmica, luminosa, mecânica, química, etc.. Ela pode ser produzida nas mais favoráveis situações como, por exemplo, junto a quedas de água, nas quais a energia hidráulica está disponível, perto de minas carboníferas ou de refinarias, onde o carvão ou o óleo pode ser utilizado de pronto ou perto dos consumidores para onde o combustível pode ser economicamente transportado (HADDAD; JAMIL, 2004, p.9).

Conforme Young *et. al.* (2009, p.71), o trabalho realizado por um campo elétrico em uma partícula carregada, como por exemplo, um elétron⁴, enquanto ela se desloca através dele, pode ser expresso como energia potencial elétrica, ou somente energia elétrica. Da mesma forma que a energia potencial gravitacional varia de acordo com a altura em que o corpo se encontra, o potencial elétrico varia de acordo com a posição da partícula carregada no campo elétrico.

2.1.3 Eficiência Energética

Segundo nota técnica, “Eficiência energética na indústria e nas residências”, publicada pelo Ministério de Minas e Energia e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE):

⁴ Os átomos são constituídos por partículas subatômicas, sendo elas elétrons, prótons e nêutrons. Os elétrons representam a carga negativa fundamental da eletricidade. (HALLIDAY, David, 2012)

[...] A eficiência no uso da energia entrou na agenda mundial a partir dos choques no preço do petróleo dos anos 1970, quando ficou claro que o uso das reservas de recurso fósseis teria custos crescentes, seja do ponto de vista econômico, seja do ponto de vista ambiental; Logo se reconheceu que um mesmo serviço poderia ser obtido com menor gasto de energia e consequentemente com menores impactos econômicos, ambientais, sociais e culturais [...] (TOLMASQUIM, *et. al.*, 2010, p.1).

Além da crise petrolífera nos anos 70⁵, mais recentemente, a preocupação com as mudanças climáticas, reflexos do aquecimento global, sendo este fortemente atribuído à produção e ao consumo de energia, motivaram novamente a busca pela eficiência no uso da energia (TOLMASQUIM, *et. al.*, 2010).

O autor ainda complementa, que a “[...] eficiência energética é a relação entre a quantidade de energia final utilizada e de um bem produzido ou serviço realizado [...]” (TOLMASQUIM *et. al.*, 2010, p. 4). Este conceito aborda a ideia de eficiência, em outras palavras, sendo um processo que menor consumo energético, para atingir o mesmo objetivo.

Em consonância a isso, para Soares, ser eficiente, na verdade, não se trata apenas de consumir menor quantidade de energia. A eficiência energética está, de fato, na relação entre o que é produzido e o que é gasto para tal (SOARES; IOLANDA, 2015). Louçano ainda acrescenta que, quanto menor é a energia dissipada ou consumida, em um mesmo sistema, maior será a sua eficiência (LOUÇANO; NELSON, 2009).

Quando se pensa em eficiência, para além das diversas características a serem consideradas em projetos de instalações elétricas, se faz necessário também, levar em consideração a redução das perdas no sistema e na sua utilização (MORENO; HILTON, 2015). Para tal, novos projetos de instalações devem se adequar às necessidades reais dos usuários, e às variações no entorno dos processos ao qual faz parte.

⁵ A crise do petróleo nos anos de 1973 foi o resultado da retaliação árabe aos aliados de Israel, após a Guerra do *Yom Kippur*, e da influência da Arábia Saudita sobre a OPAEP, órgão responsável pela regulação dos preços do petróleo, que levou à interrupção no fornecimento do petróleo e o estabelecimento de um preço muito superior do barril pelos produtores (NUNES; ANDRÉ, 2016).

2.1.4 Normas ISO 50001 e IEC 60364-8-1

A eficiência energética é tida como um grande paradigma atualmente. Ela tem por objetivo final obter o equilíbrio entre a economia, o meio ambiente e a qualidade e segurança de serviços. Neste contexto, a Organização Internacional de Normalização (ISO - *International Organization for Standardization*), publicou no ano de 2011, a normativa ISO 50001, que se refere à Sistemas de Gestão de Energia - Requisitos e linhas de orientação para a sua utilização.

Segundo o livro, “Eficiência Energética e a ISO 50001”:

A ISO 5001 fornece uma base para as organizações demonstrarem que implementam um sistema eficaz de gestão da energia, não só para atingir melhorias no seu próprio desempenho energético, como também para comprar produtos e serviços energeticamente eficientes e incorporar desenvolvimentos para a melhoria do desempenho energético (SOARES; IOLANDA, 2015. p.16).

Ao estabelecer os requisitos para um sistema de gestão de energia, a norma objetiva principalmente possibilitar às organizações estabelecerem os processos e os sistemas necessários para otimizar o seu desempenho energético, o que engloba a utilização, consumo e eficiência energética (SOARES; IOLANDA, 2015).

A Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission*) - IEC 60364-8-1, que regulamenta instalações elétrica de baixa tensão⁶, cuja parte 8-1 fala exclusivamente sobre eficiência energética, foi publicada em outubro de 2014, o que marca a inclusão das instalações de baixa tensão entre os temas que contribuem para a eficiência energética.

⁶ Devido a um campo eletrostático, uma carga é capaz de realizar um trabalho quando se desloca de um ponto a outro através de uma força, seja ela de atração ou de repulsão. Essa capacidade é chamada de potencial. Partículas carregadas com polaridades opostas produzem uma diferença de potencial elétrico entre si (d.d.p.), também conhecida como tensão elétrica (SERRALHEIRO; WERTHER, 2008).

Tabela 1 - Alguns requisitos da ISO 50001 e seus principais benefícios.

Requisitos	Benefícios
Identificação sistemática dos usos e consumos energéticos e respectivos impactos.	Tudo é considerado. Enfoque nos aspectos que têm maior potencial de poupança.
Definição de processos e de procedimentos.	Consistência na implementação. Maior eficiência nos processos.
Atribuições e responsabilidades de comunicação definidas.	Pessoal treinado, competente e com consciência das suas funções e responsabilidades. Maior envolvimento.
Implementação de controles operacionais.	Incremento de uso eficiente de recursos. Minimização das situações de risco de desvio no consumo de energia.

Fonte: Adaptado em 01/09/2019 de Iolanda Soares, 2016.

A norma traz requisitos e recomendações para instalações elétricas, conforme a ISO 50001, para projetar instalações que possibilitem a gerenciamento do desempenho energético pelos responsáveis da edificação, com o intuito de fornecer elementos que permitam ao usuário gerenciar a energia de processos, com investimentos aceitáveis (MORENO; HILTON, 2015).

Segundo o *e-book* “Norma IEC 60364-8-1 comentada pelo Professor Hilton Moreno”, sobre a norma:

Ela apresenta os requisitos e recomendações para o projeto de uma instalação elétrica dentro do contexto de uma abordagem de gerenciamento da eficiência energética, a fim de obter o melhor serviço e resultado funcional possível, com o menor consumo de energia elétrica e com o melhor equilíbrio aceitável entre a disponibilidade de energia e a economia obtida (MORENO; HILTON, 2015, p.2) .

Ainda conforme a norma comentada, sistemas de iluminação podem representar um consumo elevado de energia de uma instalação elétrica, de acordo com as lâmpadas e luminárias utilizadas (MORENO; HILTON, 2015). A iluminação é uma das maneiras mais fáceis de tornar a instalação mais eficiente, o que pode englobar, não só a utilização de lâmpadas mais eficientes, como também um sistema inteligente de controle automático das lâmpadas.

As normas de eficiência energética vistas acima só vêm a ressaltar a relevância que a eficiência energética apresenta no contexto atual, tanto para o presente momento, quanto para o futuro da humanidade. De um ponto de vista mais amplo, ser eficiente é uma atitude que só traz benefícios a quem a adota. É, por assim dizer, um dos meios de garantir a energia do futuro do planeta.

2.3 Iluminação

Segundo o artigo “Eficiência Energética na Iluminação Pública”, “[...] A iluminação corresponde à cerca de 10 a 20% do total de eletricidade consumida nos países industrializados [...]” (SOUSA; DIOGO, 2012, p. 4). A cartilha “Eficiência Energética Teoria e Prática”, por sua vez, diz que “[...] A iluminação é responsável por, aproximadamente, 23% do consumo de energia elétrica no setor residencial, 44% no setor comercial e serviços públicos e 1% no setor industrial[...]” (SANTOS *et. al.*, 2007, p. 55). Devido aos números bastante expressivos, nota-se a grande parcela da iluminação sob o consumo de energia. Conforme Santos (2007), a ineficiência energética é muito comum em sistemas de iluminação no Brasil. Diante disso, torna-se extremamente relevante falar de eficiência em sistemas de iluminação e, conseqüentemente, é necessário aprofundar os conhecimentos acerca de alguns conceitos e tecnologias empregadas.

2.3.1 Energia Luminosa

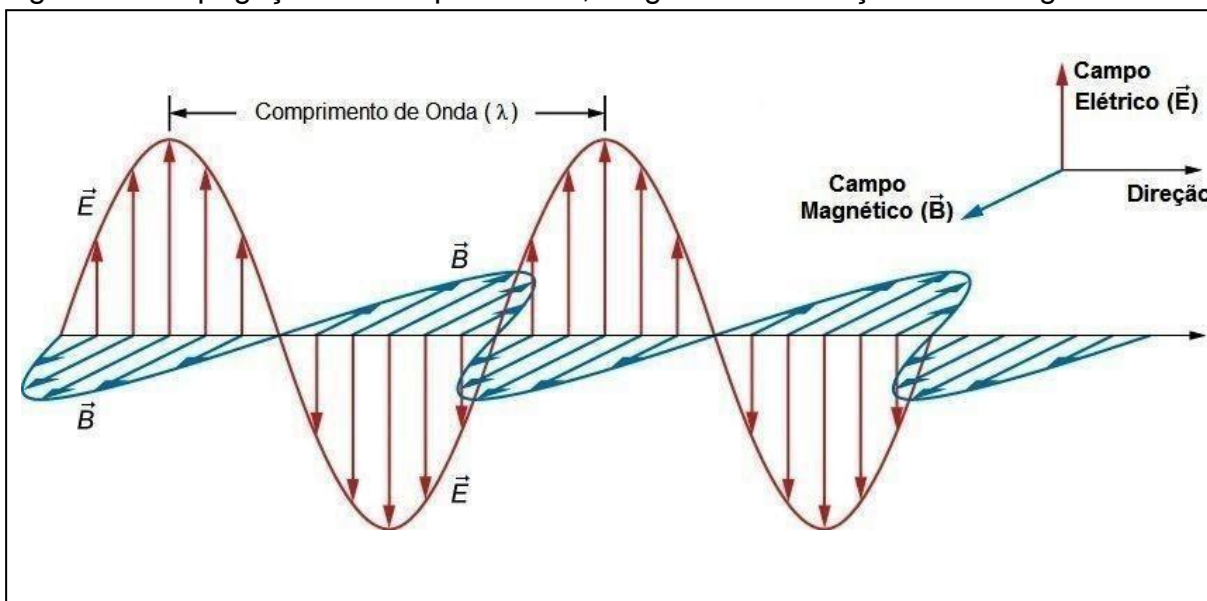
A definição mais correta para a energia na sua forma luminosa, ou simplesmente luz, é sendo a radiação eletromagnética com a capacidade de produzir uma sensação visual. Isto pois uma fonte de radiação emite determinadas ondas, as quais possuem diferentes comprimentos, e apenas uma faixa deste comprimento é perceptível pelo olho humano. Outro fator que determina a percepção de luz é a luminosidade, pois radiações de menor comprimento, como violeta e azul, geram maior sensação luminosa quando há pouca luz, enquanto

radiações de maior comprimento, como laranja e vermelho, geram maior sensação o quanto existe mais luz (SILVA; RÚBEN, 2013).

Em consonância a isto, para Machado *et. al.* (2010), a luz corresponde a parte visível do espectro eletromagnético, ou seja, radiação com comprimento de $3,9.10^{-7}$ à $7,7.10^{-7}$ metros. Para o autor [...] a luz é uma forma de energia radiante, que apresenta natureza tanto ondulatória quanto corpuscular “(MACHADO; *et. al.*, 2010, p. 2).

A Figura 2 representa a propagação da luz, que conforme a teoria ondulatória, é uma forma de radiação resultante de um campo elétrico (em vermelho) e magnético (em azul) oscilando perpendicularmente entre si.

Figura 2 - Propagação do campo elétrico, magnético e radiação eletromagnética



Fonte: Adaptado em 09/11/2020 de <https://www.omundodaquimica.com.br/academica/org1_mec_ondulatoria>..

2.3.2 Luminotécnica

A luminotécnica compreende o estudo das técnicas das fontes de iluminação artificial, desta forma, um estudo da iluminação de determinado espaço é dito como estudo luminotécnico (NODARI; LUIS, 2009). Na luminotécnica existem uma série de grandezas que serão brevemente abordadas nos subitens a seguir:

2.3.2.1 Fluxo Luminoso

O fluxo luminoso, como o nome sugere, é a parcela visível da energia radiante emitida por uma lâmpada, por exemplo, por unidade de tempo (SOUSA; DIOGO, 2012). Para Nodari, o fluxo luminoso “[...] é a potência de radiação total emitida por uma fonte em todas as direções do espaço e capaz de produzir uma sensação de luminosidade [...]” (NODARI; LUIS, 2009, p.3). A unidade de medida do fluxo luminoso é o lúmen (lm), que representa a energia luminosa por uma candela sobre uma superfície esférica unitária de raio de 1 metro.

2.3.2.2 Intensidade Luminosa

A intensidade luminosa é a grandeza que diz respeito à potência da radiação luminosa em determinada direção (LUZ; JEANINE, 2008). Como uma fonte de radiação possui distribuição uniforme em todas as direções, usam-se curvas de distribuição luminosa (CDL) para representar a intensidade luminosa em todos os ângulos de um plano. A unidade de medida da intensidade luminosa no Sistema Internacional é a candela (cd) (NODARI; LUIS, 2009).

2.3.2.3 Iluminância

Segundo Haddad *et. al.* (2012), a iluminância é definida como sendo o fluxo luminoso incidente por unidade de área iluminada. A unidade de medida adotada é o lux, e para aferir a iluminância é utilizado um luxímetro. Determinados ambientes de trabalho têm valor mínimo de iluminância média, cujos valores são recomendados pela NBR ISO/CIE 8995-1:2013, estão apresentados no Anexo A.

É importante ressaltar que, para aferir a iluminância em determinado local, é realizada uma média de iluminância, pois o fluxo luminoso não é distribuído uniformemente em todo o espaço analisado (SILVA; RÚBEN, 2013).

2.3.2.4 Luminância

A luminância, por definição, é a relação entre a intensidade luminosa (cd) incidente em uma superfície, e a área vista pelo observador (LUZ, 2008). Para Haddad (2012) “[...] A Luminância de uma superfície é a medida da luminosidade que um observador percebe refletido desta superfície [...]” (HADDAD, *et. al.*, 2012, p. 128). E segundo Nodari (2010), “[...] A luminância depende tanto do nível de iluminação ou iluminância quanto das características de reflexão das superfícies [...]” (NODARI, LUIZ, 2010, p. 4). A unidade de medida da luminância é o candela por metro quadrado (cd/m²). A Figura 3 abaixo mostra a diferença entre as duas grandezas citadas.

Figura 3 - Diferença entre iluminância e luminância.



Fonte: Adaptado em 14/11/2020 de <[https://fau.usp.br/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0213/Material_de_Apoio/03_-_la_Conceito_Fundamentais_\(grandezas_Luminosas\).pdf](https://fau.usp.br/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0213/Material_de_Apoio/03_-_la_Conceito_Fundamentais_(grandezas_Luminosas).pdf)>.

2.3.2.5 Rendimento Luminoso

O rendimento luminoso, ou eficiência luminosa, é o indicador da conversão de energia em luz por uma determinada fonte luminosa. Segundo Silva (2013) “[...] Este indicador relaciona o fluxo luminoso emitido em função da potência elétrica⁷ desta fonte luminosa. Um valor elevado de eficiência luminosa significa que a fonte luminosa consome uma quantidade de energia reduzida para gerar fluxo luminoso [...]” (SILVA; RÚBEN, 2013, p. 8).

2.3.2.6 Temperatura de Cor

A temperatura de cor indica a cor aparente da luz emitida e é medida em Kelvin (K), variando de 1500 K, cuja aparência é laranja ou vermelha, até 9000 K, cuja aparência é azul ou violeta (HADDAD et. al., 2012). Quando se refere a luzes quentes ou frias, se objetiva caracterizar a tonalidade de cor que a luz emite no ambiente (SILVA; RÚBEN, 2013).

2.3.2.6 Índice de Reprodução de Cor

O Índice de Reprodução de Cor (IRC) representa, bem como o nome sugere, a capacidade que uma fonte luminosa artificial tem de reproduzir fielmente as cores de um objeto. Este índice expressa, de 0 a 100, a capacidade do sistema de iluminação artificial de se aproximar da iluminação natural, sendo um parâmetro adimensional (SILVA; RÚBEN, 2013).

⁷ A potência elétrica, dada em Watts (W) pelo Sistema Internacional de Medidas, é o produto da tensão pela corrente. Ela representa o trabalho realizado no deslocamento das cargas elétricas em função do tempo, onde a tensão é a força sobre as cargas, e a corrente a quantidade em função do tempo (SERRALHEIRO; WERTHER, 2008).

2.3.2.7 Norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013

Conforme já citado, alguns ambientes de trabalho tem valor mínimo de iluminância média, e a norma nacional que define estes níveis é a ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013, elaborada no comitê brasileiro de eletricidade, pela Comissão de Estudo de Aplicações Luminotécnicas e Medições Fotométricas, que entrou em vigor no ano de 2013, cancelando e substituindo as versões anteriores.

A norma tem como objetivo especificar os requisitos mínimos de iluminação em locais de trabalho de modo que os ocupantes executem suas tarefas visuais de forma eficiente, com conforto e segurança. A norma não especifica como devem ser projetados os sistemas de iluminação, sendo assim fica à critério do projetista a maneira como irá atender os critérios da norma (ABNT, 2013).

2.3.3 Fontes de Iluminação Artificial

Segundo Rodrigues (2002), “[...] As lâmpadas modernas são fontes luminosas de origem elétrica [...]” (RODRIGUES; PIERRE, 2002, p. 11). A principal função de uma lâmpada é converter energia elétrica e luz visível. Atualmente, existem vários tipos de fontes de iluminação artificial, com várias características diferentes (SILVA; RÚBEN, 2013). Ao longo deste trabalho serão abordados os dois principais tipos de lâmpadas utilizadas em ambientes internos, sendo elas: a lâmpada fluorescente tubular, e a *LED* tubular, que é a sua concorrente direta cujo nome mais comum é a sigla que deriva do inglês *Light Emitting Diode*, ou seja, diodo emissor de luz.

Figura 4 - Lâmpadas tubulares comerciais: *LED* e fluorescente.



Fonte: Adaptado em 01/09/2019 de <<http://www.adeel.com.br/diferencas-entre-lampadas-tubulares-led-e-fluorescentes/>>.

2.3.3.1 Lâmpada Fluorescente

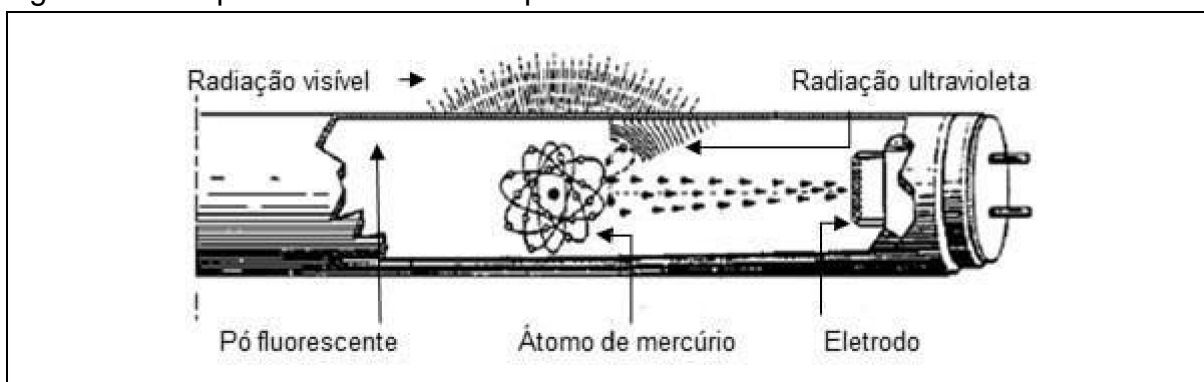
Segundo Silva (2013) “[...] Mais de 70% da iluminação artificial mundial é da responsabilidade das lâmpadas fluorescentes [...]” (SILVA; RÚBEN, 2013, p.15), isto se deve ao seu elevado rendimento, e grande número de variações de luminosidade, temperatura de cor e índice de reprodução cromático.

As lâmpadas fluorescentes (Figura 5) são lâmpadas de descarga de baixa pressão, onde a luminosidade é obtida através do processo de luminescência, onde a passagem de corrente⁸ elétrica em determinado gás gera radiação ultravioleta, por sua vez o fósforo, presente nas paredes internas da lâmpada, atua como um conversor de radiação, transformando um comprimento de onda específico de radiação ultravioleta em luz no espectro visível (WITKOVSKI; ANDERSON, 2004).

Elas são compostas, geralmente, por um bulbo com um filamento em cada extremidade, contendo vapor de mercúrio em baixa pressão com uma quantidade de gás inerte para facilitar a partida. Seu bulbo é recoberto internamente com uma camada de pó fluorescente ou fósforo, os quais determinam a quantidade e a temperatura da luz emitida. As lâmpadas fluorescentes em geral necessitam de um reator para fazer a sua partida (HADDAD *et. al.*, 2012).

⁸ A corrente elétrica é a denominação dada ao movimento ordenado dos elétrons, quando aplicada uma diferença de potencial elétrico, através de um condutor, ou seja, o fluxo de elétrons (SERRALHEIRO; WERTHER, 2008).

Figura 5 - Componentes de uma lâmpada fluorescente tubular.



Fonte: Adaptado em 21/09/2019 de WITKOVSKI, ANDERSON.

Os eletrodos encontram-se selados no interior do bulbo em cada uma das extremidades da lâmpada. Os filamentos, ou eletrodos, são semelhantes aos da lâmpada incandescente, no entanto trabalham em temperaturas mais baixas e apresentam revestimento de um material com baixa função de trabalho, como o óxido de bário, que emite elétrons por efeito termoiônico⁹. Na partida, os filamentos são aquecidos pela circulação da corrente, até atingir a temperatura desejada, a qual é mantida pelo calor gerado na descarga com a lâmpada já em funcionamento (WITKOVSKI; ANDERSON, 2004).

Antigamente o tubo de descarga das lâmpadas fluorescentes mediam 38 mm de diâmetro e estas utilizavam um pó fluorescente comum. Com o passar do tempo foram desenvolvidas lâmpadas com tubo de descarga cada vez menores, mas utilizando um novo tipo de revestimento, o pó trifósforo. Atualmente existem lâmpadas fluorescentes que apresentam um tubo de descarga com diâmetro ainda menor, garantindo um elevado rendimento. Uma redução do diâmetro do tubo representa melhor controle do feixe luminoso e aumento do rendimento luminoso (SILVA; RÚBEN, 2013).

⁹ Quando um material recebe energia térmica, seus elétrons ganham energia cinética. Se esta energia for suficiente para superar a barreira de potencial da superfície do material, haverá a emissão destes elétrons. Este efeito é denominado efeito termoiônico (LIMA, *et. al.*, 2001).

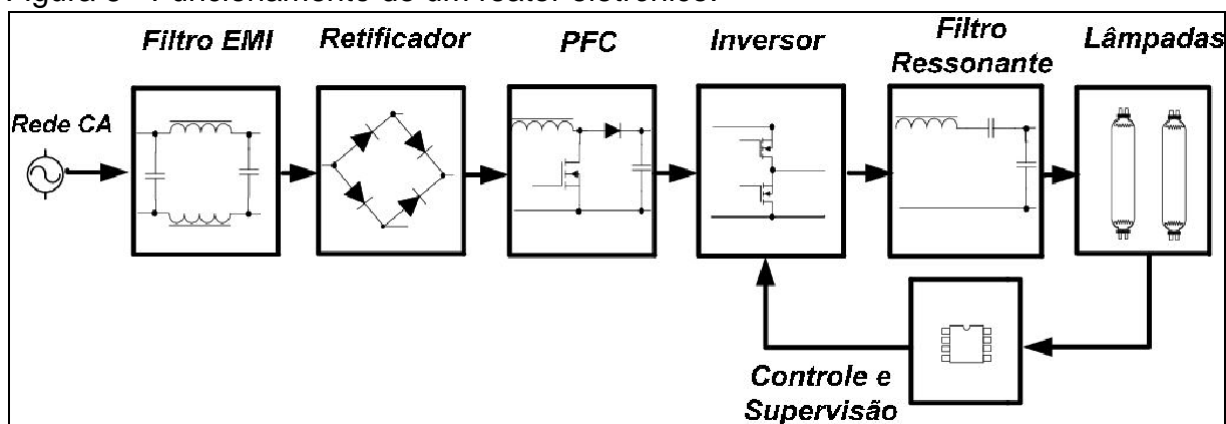
São utilizados dois tipos de gases no interior da lâmpada, um deles para a ignição, e outro para gerar a radiação ultravioleta. O gás utilizado no interior de tubo da lâmpada para facilitar o processo de ignição é um gás inerte com baixo potencial de ionização, geralmente argônio puro ou uma mistura de argônio, neônio e criptônio, para facilitar a ignição da lâmpada e também maximizar a produção de radiação. Quanto ao gás que irá gerar radiação ultravioleta, o seu tipo e pressão influenciam diretamente na eficiência da lâmpada, geralmente se adota o vapor de mercúrio (WITKOVSKI; ANDERSON, 2004).

Segundo Silva (2013), “[...] O espectro de emissão das lâmpadas fluorescente não é contínuo e é mais largo do que o emitido pelas lâmpadas incandescentes, a luz é predominantemente difusa sendo adequada para iluminar grandes áreas [...]” (SILVA; RÚBEN, 2013, p.17). O autor também aponta que 25% da energia consumida pelas lâmpadas fluorescentes é transformada em luminosidade, sendo o restante transformado em radiação não visível e em calor.

2.3.3.2 Reatores de Lâmpadas Fluorescentes

Conforme o texto acima, sabe-se que lâmpadas fluorescentes, ou de descarga, em geral necessitam de reatores para o seu funcionamento, os quais são responsáveis pela sua ignição e estabilização da corrente. Os reatores (Figura 6) foram aprimorados por bastante tempo, e atualmente, o reator mais usado é o do tipo eletrônico. O funcionamento de um reator eletrônico consiste em converter a corrente alternada, da rede, e transformá-la em corrente contínua. A tensão, agora contínua, obtida através da conversão, então passa por um inversor de frequência, o qual converte a em corrente alternada novamente, só que em alta frequência, sendo esta, a frequência adequada para a alimentação das lâmpadas, e após estas conversões a alimentação ainda passa por circuitos que realizam a ignição e estabilização da corrente (WITKOVSKI; ANDERSON, 2004).

Figura 6 - Funcionamento de um reator eletrônico.



Fonte: Adaptado em 08/12/2020 de <<https://www.semanticscholar.org/paper/Reator-eletr%C3%B4nico-para-l%C3%A2mpadas-fluorescentes-em-Dupczak/>>.

O inversor gera uma tensão com frequência constante, cujo valor é superior a 18 kHz, e inferior a 50 kHz para evitar problemas de interferência em ondas de rádio. As funções de ignição e estabilização da corrente são realizadas por circuitos utilizando indutores e capacitores. Os reatores eletrônicos são mais eficientes, pois reduzem bastante as perdas, aquecem menos, e a alta frequência pode gerar elevação no fluxo luminoso, que varia de 6% a 12% (WITKOVSKI; 2004).

2.3.3.3 Diodo Emissor de Luz (*Light-Emitting Diode* - LED)

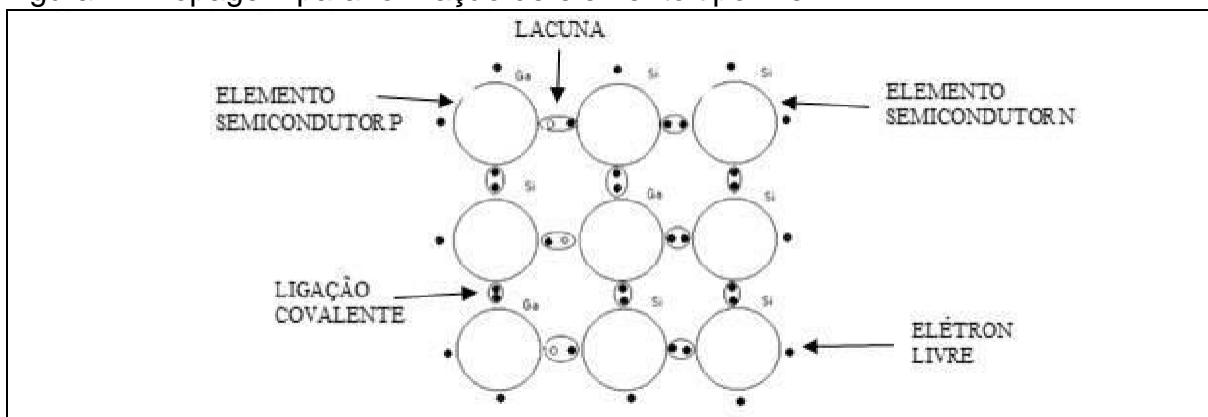
O diodo emissor de luz, ou *LED*, como o nome sugere, é um diodo semicondutor que quando energizado emite luz visível. A emissão de luz pela aplicação de uma fonte elétrica de energia se baseia no processo de eletroluminescência. O *LED* é um componente bipolar, ou seja, possui dois pólos, sendo um chamado de cátodo e o outro e ânodo, assim, dependendo de como for polarizado, permite ou não a passagem de corrente, e consequentemente a geração ou não de luz (MARTELETO; DOUGLAS, 2011).

A luz, em poucas palavras, é um efeito oscilatório de elétrons. Os fótons são as unidades básicas de luz, e no *LED*, são liberados com o movimento dos elétrons. Para um elétron pular de um nível de energia mais baixo para um nível mais alto, ele precisa receber energia, e o inverso ocorre quando ele muda de um nível mais alto

para o mais baixo, ou seja, ele libera energia, e essa energia é liberada em forma de um fóton. Quanto maior a queda de energia, maior será a energia liberada em forma de fóton, o que caracteriza uma alta frequência. Tendo em vista isso, o material no qual é construído o semiconductor irá definir a quantidade de energia liberada em forma de energia (MARTELETO; DOUGLAS, 2011).

Um diodo é formado por uma junção P-N (Figura 7), na qual existem portadores de carga elétrica, íons fixos e átomos constituintes do material utilizado. Um material tipo P é basicamente um semiconductor, que através da introdução de impurezas, elementos com três elétrons na sua camada de valência, que formam uma ligação covalente entre o semiconductor e a impureza. Quando essa impureza é introduzida, faltará um elétron em uma das ligações atômicas do semiconductor. Essa falta fará uma lacuna. Por sua vez, um material tipo N é formado a partir da associação de um elemento com cinco elétrons na sua última camada, ao semiconductor, estes irão formar uma ligação covalente, na qual haverá a liberação de um elétron livre (BOYLESTAD *et. al.*, 2013).

Figura 7 - Dopagem para formação de elemento tipo P e N

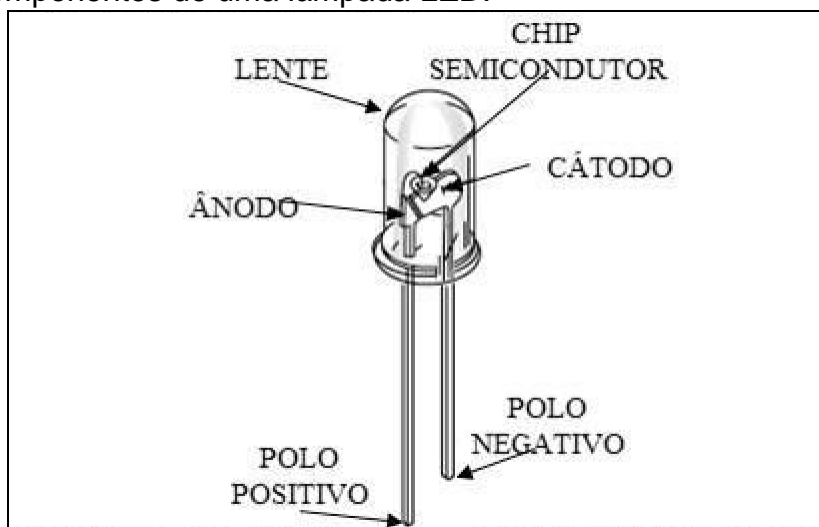


Fonte: Adaptado em 22/09/2019 de MARTELETO, DOUGLAS, 2011.

O funcionamento de um *LED* se baseia em diodos com capacidade de transformar energia elétrica diretamente em luz. Se a tensão aplicada entre o catodo e o anodo deste diodo for adequada aos materiais dos semicondutores, um deles produzirá um elétron livre e o outro uma lacuna, este fenômeno é chamado de

geração de pares elétrons-lacunas. Após a geração deste par, o elétron livre gerado vai de encontro à lacuna, e essa recombinação exige que o elétron perca energia. Quando um elétron perde energia em forma de fótons para se recombinar com a lacuna que está na camada de valência do outro elemento, ele gera um equilíbrio em ambos os átomos, este fenômeno é denominado de recombinação de pares elétrons-lacunas. Esta transição de um elétron de uma banda de maior energia para outra de menor é responsável pela emissão de um fóton, em outras palavras, luz (MARTELETO; DOUGLAS, 2011).

Figura 8 - Componentes de uma lâmpada LED.



Fonte: Adaptado em 28/09/2016 de <http://1.bp.blogspot.com/_LOVRAHbPLVI/TI5ZTFXkXtl/AAAAAAAdsFQOWYgFAQZk/s320/led5.gif>

Os LEDs (Figura 8) apresentam vários benefícios em relação às demais lâmpadas, dentre eles, vida útil que pode chegar até 50.000 horas de funcionamento, alta eficiência luminosa, possibilidade de variar cor e intensidade, baixo consumo, entre outros (HADDAD *et. al.*, 2012).

2.3.3.4 Acionamento de *LED*'s

Conforme supracitado, os *LEDs*, são nada menos do que um diodo emissor de luz, logo, seu funcionamento não se difere ao de um diodo convencional. Deste modo, ao alimentar um *LED* com tensão de corrente alternada (CA), o diodo produziria luz somente no seu semiciclo positivo em relação aos seus terminais, funcionando como um retificador de meia onda. Assim, para o bom funcionamento das lâmpadas sua alimentação é feita em corrente contínua, através de um retificador embutido nos seus terminais, lembrando que uma lâmpada é composta por uma série de diodos.

É possível alterar o fluxo luminoso de um *LED*, de duas maneiras, uma delas é variar linearmente a corrente que passa através do diodo, e a outra é a modulação por largura de pulso (*Pulse-Width Modulation - PWM*). A primeira opção proporciona variação linear da corrente através do diodo, enquanto que na modulação por *PWM* a corrente passa em formato de onda quadrada (PEIXOTO *et. al.*, 2018). No entanto, estes tipos de dimerização não são compatíveis com as lâmpadas *LED* convencionais.

2.4 Circuito de Controle

A partir do advento da computação, o controle automático passou a ser essencial em grande parte dos processos na área da engenharia e da ciência. O controle está intrínseco nos mais diversos sistemas, como por exemplo, sistemas robóticos e sistema de manufatura ou processos industriais que envolvam controle de temperatura, pressão, umidade, viscosidade, vazão, entre outros. Sendo assim, se torna interessante o seu uso em aplicações além da indústria, como por exemplo, a iluminação.

Em sistemas de controle, o processo que se deseja controlar é a grandeza que é medida e consequentemente controlada. O sinal de controle é a grandeza alterada pelo controlador, de maneira que o valor da variável controlada seja

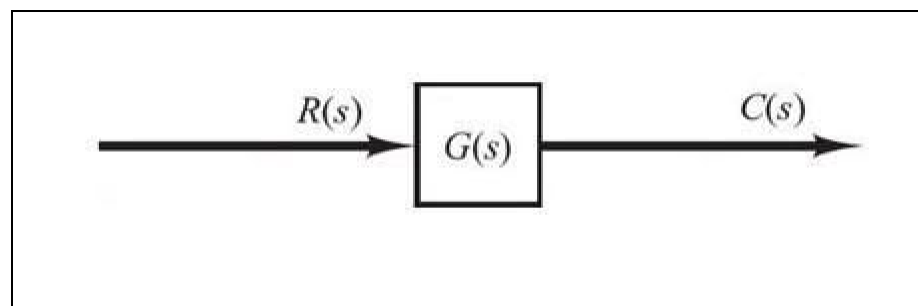
afetado. Geralmente, a grandeza controlada é a saída do sistema, no entanto, o sinal de saída é também apenas uma referência. A grosso modo, controlar significa medir o valor da grandeza a qual deseja ser controlada, normalmente através de sensores, e aplicar o sinal de controle no sistema, para obter o valor ou resultado esperado (OGATA, KATSUHIKO; 2011).

Os sistemas de controle podem ser divididos em dois tipos, sendo eles os sistemas de controle em malha aberta e os sistemas de controle em malha fechada. Estes dois tipos se diferem pela maneira como é feito o controle, que é a parte responsável para a saída do sistema.

2.4.1 Controle em Malha Aberta

Sistemas de controle de malha aberta (Figura 9) caracterizam-se pela ação de controle atuar independente da saída, sendo assim, o valor da saída não tem efeito na ação de controle. Exemplos práticos destas malhas de controle são aqueles em que o processo é realizado sem comprovação da ação controlada, como por exemplo, o controle de tráfego por meio de semáforos, operando somente de acordo com tempos pré-determinados (NETO, *et. al.*, 1999).

Figura 9 - Diagrama de blocos de um sistema de controle de malha aberta



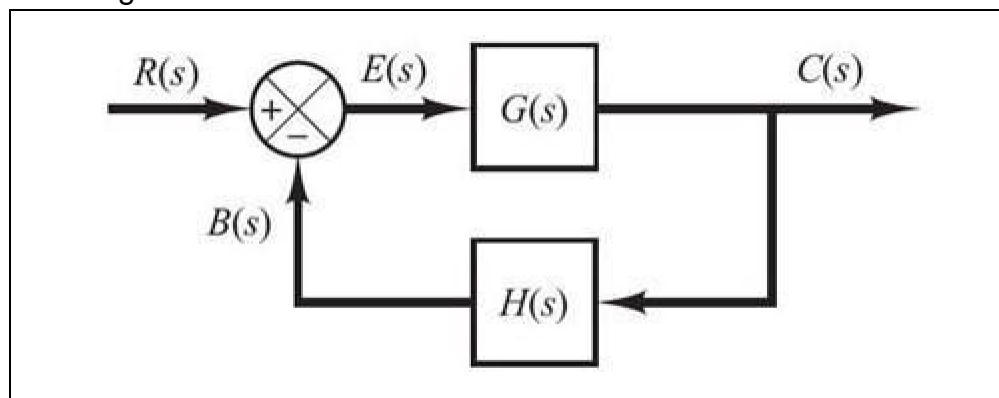
Fonte: Adaptado em 28/09/2019 de KATSUHIKO OGATA, 2013.

Em sistemas de malha aberta, a entrada de referência não é comparada com a saída, desta forma, para cada entrada, o sistema responde de maneira fixa, e a precisão fica dependente da calibração do sistema. Na presença de algum distúrbio, este tipo de sistema de controle não executará a tarefa da forma desejada. Esta prática de controle, fica restrita a ser utilizado em processo em que a relação entre a entrada e a saída for conhecida e sem ocorrência de distúrbio (OGATA, KATSUHIKO, 2011).

2.4.2 Controle em Malha Fechada

Por sua vez, sistemas de controle de malha fechada são aqueles em que a ação de controle tem relação com a saída. Deste modo, a saída é sempre comparada com a entrada com o objetivo de reduzir o erro tornando a saída do sistema mais precisa (NETO et. al., 1999). Nestes sistemas o erro atuante, que resulta da diferença entre a entrada e a saída, realimenta o controlador (Figura 10). Exemplos de sistemas de malha fechadas, são aqueles em que existe um elemento responsável pela realimentação da entrada, ou seja, uma referência da grandeza que deseja ser controlada (OGATA, KATSUHIKO, 2011).

Figura 10 - Diagrama de blocos de um sistema de controle de malha fechada.



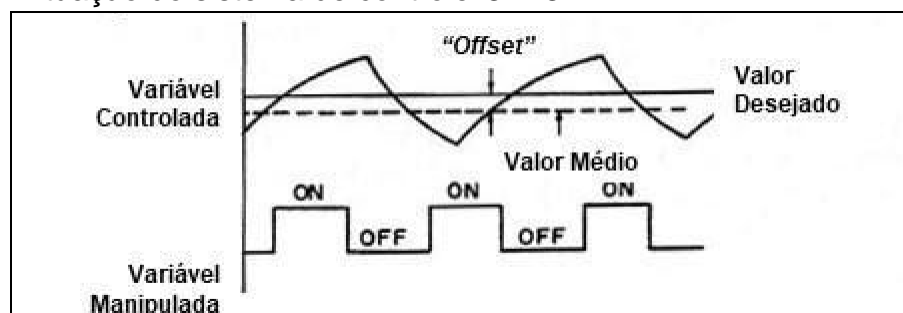
Fonte: Adaptado em 28/09/2019 de KATSUHIKO OGATA, 2013.

A vantagem dos sistemas de malha fechada é que o uso da realimentação faz com que a resposta do sistema se adapte aos distúrbios externos e variações. Apesar de serem mais precisos, sistemas de malha fechada são mais suscetíveis à instabilidades, quando a correção do erro é o que ocorre além do necessário, causando oscilações indesejadas. Desse modo, sendo vantajoso apenas em sistemas onde não se tem conhecimento com antecipação das entradas ou que apresentem distúrbios ou alterações no sistema (OGATA, KATSUHIKO, 2011).

2.4.3 Ação de Controle *ON-OFF* (Liga-Desliga)

Dentre todas as ações de controle, a ação *ON-OFF* é considerada a mais simples e de maior facilidade de implementação, e por isso, é a que tem maior emprego em sistemas de controle tanto industriais como domésticos. Como o nome sugere, este tipo de ação de controle se baseia em apenas duas posições para o elemento final de controle, manipulando rapidamente o estado da variável controlada. A Figura 11 ilustra seu princípio de funcionamento.

Figura 11 - Atuação do sistema de controle *ON-OFF*.

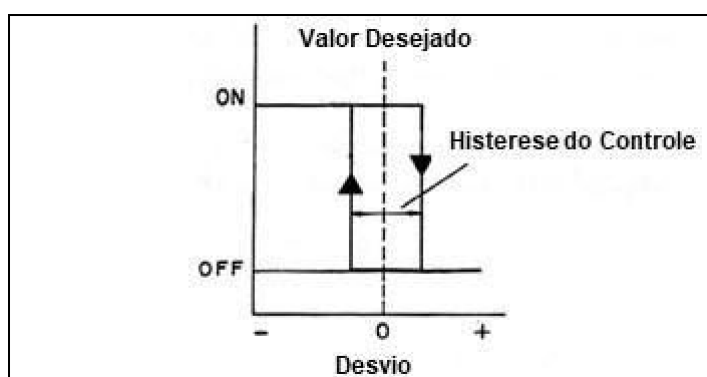


Fonte: Adaptado em 28/09/2019 de NETO *et. al.*, 1999.

Devido esta ação de controle levar a variável controlada sempre a uma das suas posições extremas, para evitar oscilações contínuas, é necessária a aplicação de uma histerese, ou seja, uma tolerância aplicada, para evitar um chaveamento à frequências acima da desejada. Esta tolerância, por consequência, gera um erro constante no controle, chamado de *off-set*. Como o sistema implementado neste

projeto de monografia necessita atender apenas os limites mínimos, esta ação de controle serve ao propósito ao qual será empregada (NETO *et. al.*, 1999). Na figura a seguir, pode ser vista a representação gráfica de histerese.

Figura 12 - Histerese na atuação do sistema de controle *ON-OFF*.

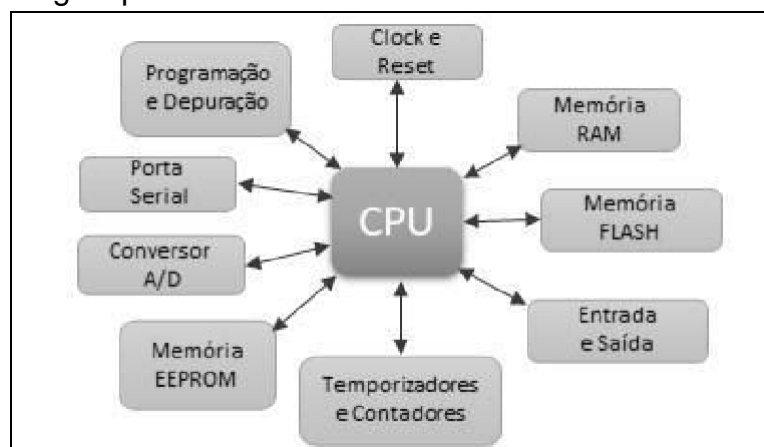


Fonte: Adaptado em 28/09/2019 de NETO *et. al.*, 1999.

2.4.4 Microcontrolador

Pela grande versatilidade e baixo custo, praticamente qualquer eletrônico pode fazer uso dos microcontroladores. Os microcontroladores são nada menos que controladores que possuem tudo necessário para seu funcionamento num único circuito integrado (CI), dependendo apenas de uma fonte de alimentação. Basicamente, são computadores em um único *chip* (KERSCHBRAUMER, RICARDO, 2018). Na Figura 13 é possível observar a topologia típica de um microcontrolador, com seus periféricos, todos encapsulados no mesmo circuito integrado.

Figura 13 - Topologia típica de um microcontrolador.



Fonte: Adaptado em 12/10/2020 de RICARDO KERSCHBAUMER, 2018.

Um microprocessador é composto basicamente por uma unidade central de processamento (CPU) acrescido de um conjunto de periféricos. Dentre estes periféricos, pode-se destacar a memória de dados (memória *flash*), a memória de programa (memória EEPROM) e o circuito de *clock*¹⁰. O maior diferencial dos microcontroladores é já integrarem todos seus periféricos no próprio CI, assim podendo realizar todas ações programadas de maneira autônoma (KERSCHBAUMER, RICARDO, 2018).

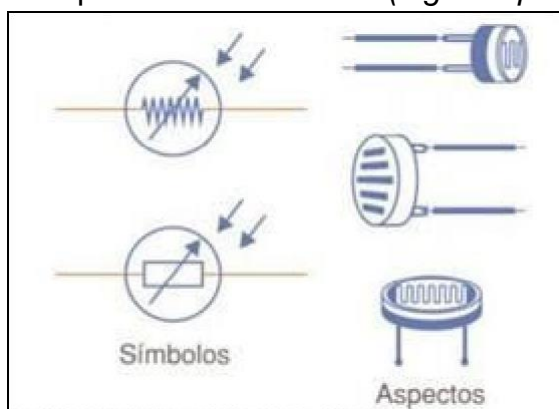
2.4.5 Sensor Fotoelétrico

Para realizar captação da luminosidade em um ambiente, é necessário a adoção de algum tipo de sensor. Uma das alternativas é o uso dos resistores dependentes de luz (*Light Dependent Resistors - LDR*). Este tipo de sensor, de construção bastante simples, varia a sua resistência ôhmica¹¹ de acordo com a luminosidade incidente nele. Quanto maior a incidência da luz sobre este sensor, menor será a sua resistência (ALVES; LUIZ, 2013).

¹⁰ *Clock*, do inglês, é o sinal de relógio responsável pela sincronização das operações (KERSCHBAUMER, RICARDO, 2018).

¹¹ A Resistência Ôhmica (Ω), é a grandeza que expressa o impedimento sofrido pelos elétrons, quando aplicada uma diferença de potencial, ao atravessarem um condutor (BOYLESTAD, *et. al*, 2013).

Figura 14 - Simbologia e aspecto do sensor *LDR* (*Light Dependent Resistor*).



Fonte: Adaptado em 28/09/2019 de EUGENIO ROSSETTI, 2017.

2.4.6 Relés

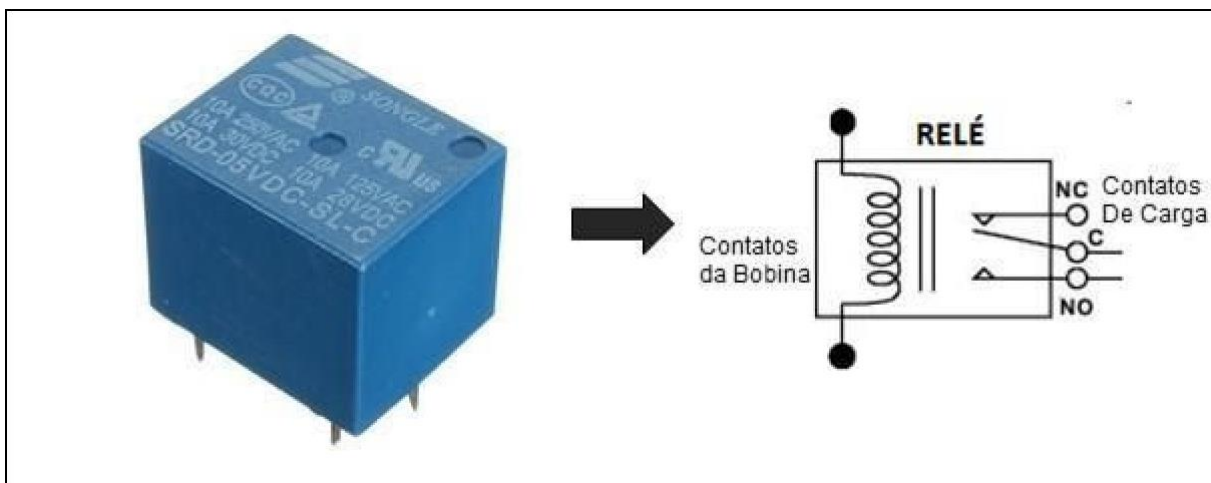
Relés são dispositivos eletromecânicos que atuam realizando a comutação de contatos elétricos (contatos de carga), abrindo e/ou fechando esses contatos quando sua bobina¹² interna é energizada, geralmente através de um sinal de baixa tensão. O relé possui uma bobina, e um contato preso a uma mola que serve para seu rearme. Quando é aplicada um sinal de tensão nesta bobina, ela produz uma corrente, e então um campo eletromagnético é gerado, fazendo com que os contatos do interruptor fechem, acionando a carga a carga do relé, sem misturar os sinais (ALVES; LUIZ, 2013).

Devido a esta característica, ele é muito utilizado nas mais diversas aplicações, pois possibilita o acionamento de cargas maiores, com tensões muito maiores como 220 Volts¹³, a partir de pequenos sinais de tensão, geralmente de 5 e 12 Volts. A figura abaixo ilustra os aspectos físicos de um relé

¹² Enrolamento ou bobina, é como são popularmente conhecidos os indutores, componente elétrico com propriedades indutivas, composto de um condutor isolado, enrolado em forma helicoidal, com finalidade de gerar um campo magnético para diversos fins (SADIKU *et. al.*, 2013).

¹³ O Volt (V) é a unidade de medida da diferença de potencial elétrica, também conhecida como tensão, pelo Sistema Internacional de Medidas (S.I.) (SERRALHEIRO; WERTHER, 2008).

Figura 15 - Esquema de funcionamento de um relé.



Fonte: Adaptado em 28/09/2019 de <<https://athoselectronics.com/rele/>>.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

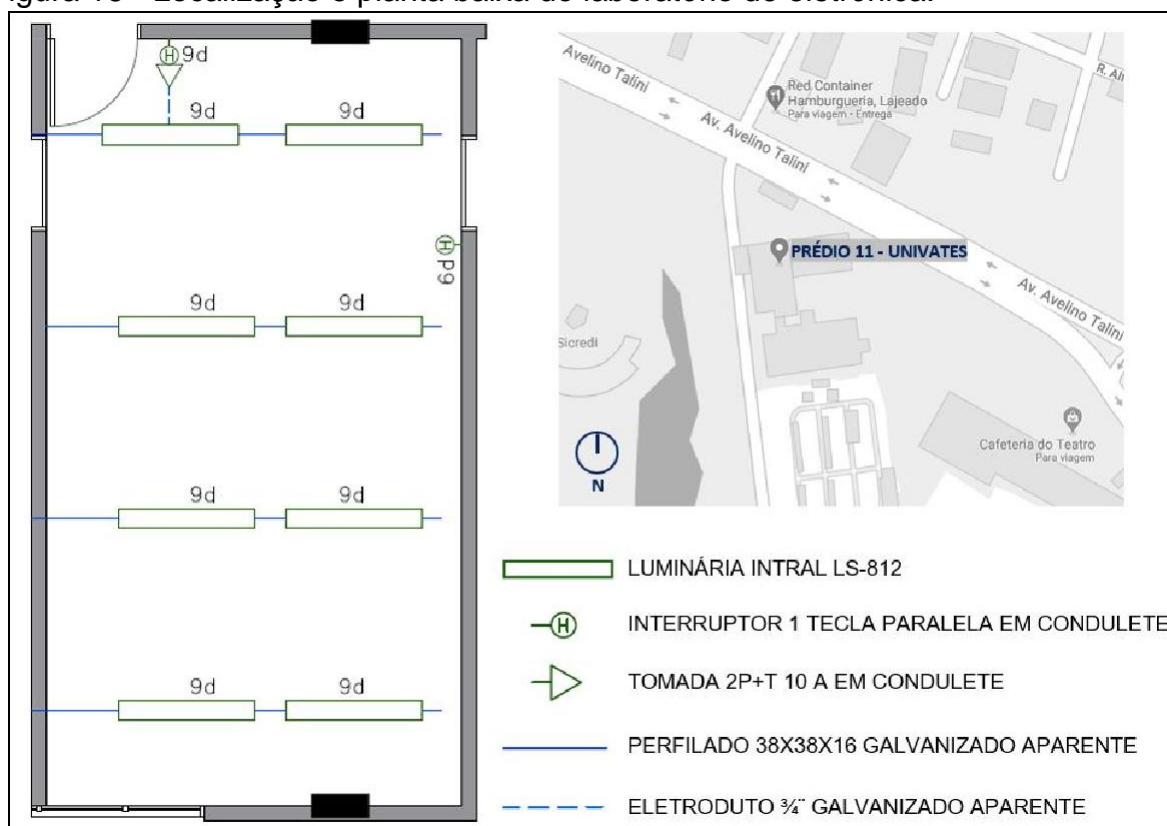
Inicialmente foi realizada uma análise sobre as características do ambiente onde o sistema de controle foi aplicado, seguida de uma descrição dos métodos utilizados para a implementação deste sistema e dos componentes que envolvem a sua aplicação, além dos critérios necessários para o seu desenvolvimento.

3.1 Características do Ambiente

O primeiro passo para realização da análise e aplicação de um sistema otimizado, é fazer o diagnóstico do espaço onde será aplicado. O local onde se desenvolveu o presente trabalho é um anexo à sala 412 situado no Prédio 11, setor B da Instituição de Ensino Superior (IES) Universidade do Vale de Taquari - Univates, que se localiza na Avenida Avelino Talini, 171, Lajeado - RS, que se caracteriza por ser um laboratório de desenvolvimento (Figura 16), onde são realizados trabalhos práticos de disciplinas dos cursos técnicos e graduação, na área de eletrônica.

O laboratório tem cerca de 35 m² de área, com forro alveolar e paredes em alvenaria, com pintura na cor branca e piso cerâmico de cor clara, pé direito com cerca de 3 metros de altura, e uma janela de aproximadamente 1,5 m² por onde recebe luz natural (Figura 17). As instalações elétricas da sala são todas sobrepostas, sendo as luminárias instaladas em perfilados perfurados de 38X38mm, como mostra a figura abaixo.

Figura 16 - Localização e planta baixa do laboratório de eletrônica.



Fonte: Adaptado 07/12/2022 de <<https://www.google.com.br/maps/@-29.4446551,-51.9550242,18z>>.

Figura 17 - Imagens do laboratório onde o trabalho foi desenvolvido.



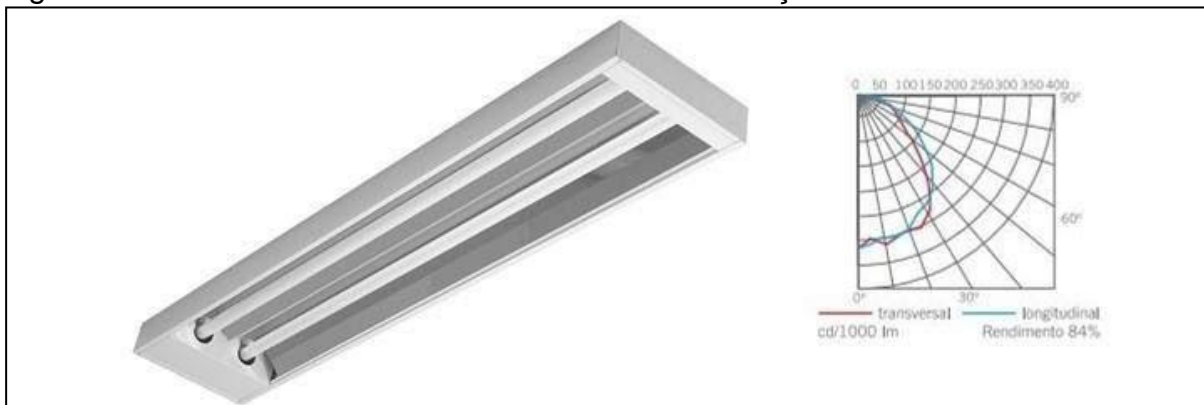
Fonte: Do Autor (2020).

3.2 Características do Sistema de Iluminação Atual

Para a iluminação, o espaço possui oito luminárias de sobrepor, fixadas em perfilado metálico, fabricadas pela Intral, modelo LS-812, cujas dimensões são 65x246x1315 (Altura x Largura x Comprimento), construída em chapa de aço tratado e pintado, com refletor facetado em alumínio anodizado brilhante de alta refletância e alta pureza 99,85%, com soquete tipo *push-in* G-13 de engate rápido, rotor de segurança em policarbonato e contatos em bronze fosforoso, contando atualmente com duas lâmpadas fluorescentes T8 de 32W.

Na Figura 18 é possível observar o modelo da luminária utilizada na iluminação do espaço, conforme a descrição supracitada, além do gráfico que indica o ângulo de abertura do seu refletor, citado na parte interna da luminária, superior às lâmpadas. Este refletor é responsável por dispersar o fluxo luminoso fazendo com que o ambiente tenha maior homogeneidade luminosa e também ampliar o alcance deste fluxo. Esta amplitude é retratada pela curva de distribuição.

Figura 18 - Luminária Intral LS-812 e curva de distribuição luminosa.



Fonte: Adaptado em 04/10/2020 de INTRAL, 2020.

As lâmpadas utilizadas no laboratório são fluorescentes tubulares, da fabricante OSRAM, modelo T8 FO32W/640. A potência das lâmpadas é de 32 W, com temperatura de cor de 4.000 K e fluxo luminoso nominal de 2350 lm, ou seja, eficiência luminosa de aproximadamente 73 lm/W, e sua vida útil média estimada em 20.000 horas (OSRAM, 2019).

Por se tratar de uma lâmpada fluorescente, necessita de reator para seu funcionamento, e nestas luminárias é utilizado um reator eletrônico, da fabricante Intral, modelo POUP AFP-6F 2X32, em cada. Cada reator atende duas lâmpadas, sendo assim, são utilizados um total de oito reatores em toda a instalação. Segundo os dados de fabricante, a corrente de entrada do reator é de 0,315 ampéres, com fator de potência de 0,97 capacitivo, frequência de operação de aproximadamente 35 kHz e vida útil de 30.000 horas, tendo um consumo total do conjunto (lâmpadas e reator) de aproximadamente 70 W, sendo assim a eficiência luminosa, acrescentando o consumo do reator, de 67 lm/W (INTRAL, 2019).

3.2.1 Método de Medição de Iluminância

Para realizar o diagnóstico do sistema atual de iluminação, realizou-se uma medição da iluminância, nas mais diversas condições da iluminação natural do ambiente, buscando se certificar de que ela atende as especificações apontadas na norma NBR ISO/CIE 8995-1:2013, conforme o Anexo I (FREIRE, JOÃO; 2018).

Figura 19 - Luxímetro digital Minipa utilizado nas medições de iluminância.



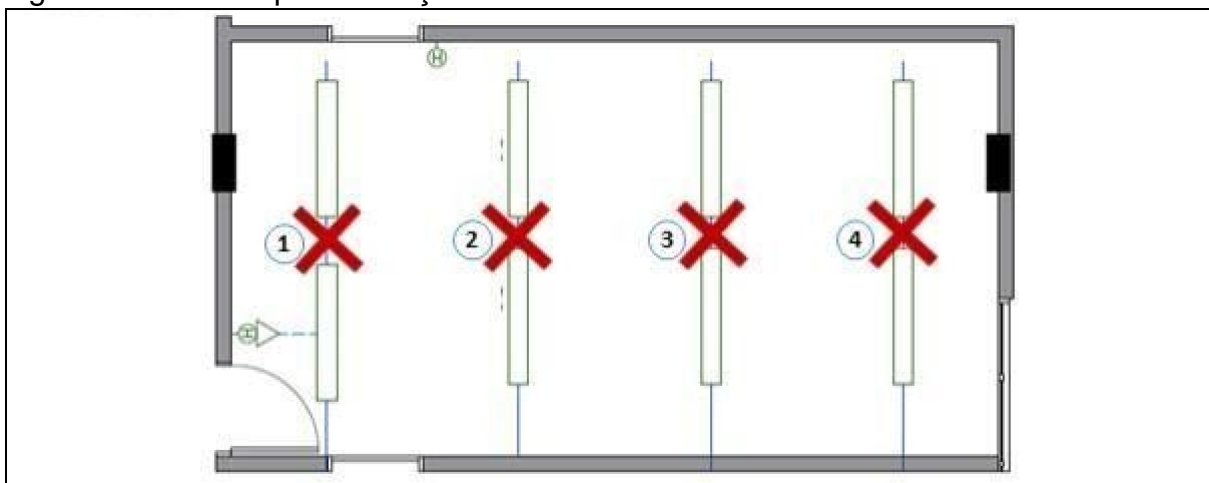
Fonte: Adaptado em 01/11/2019 de <<http://antferramentas.vteximg.com.br/arquivos/ids/161645-1000-1000/Luxemetro-Digital-Minipa-MLM-1011-ant-ferramentas.jpg>>

O medidor de iluminância utilizado foi um luxímetro digital (Figura 19), da fabricante Minipa, modelo MLM-1011, que utiliza um fotodiodo de silício para medições de alta precisão. Este medidor proporciona medidas na unidade Lux, com faixa de 1 a 2.000, 10 a 20.000 e 100 a 100.000 Lux. O equipamento possui precisão indicada pelo fabricante de $\pm 4\%$ até 10.000 Lux, e $\pm 5\%$ acima disto, com coeficiente de temperatura de $\pm 0,1\%/^{\circ}\text{C}$ (MINIPA, 2010).

Para ter um parâmetro mais confiável nas comparações entre os sistemas analisados, foi criado um procedimento padrão para as medições de iluminância no ambiente. Neste procedimento, foram definidos quatro pontos (representados com um "X" vermelho na Figura 20), onde foram realizadas as aferições sempre à uma altura padrão, de 1,50 metros. Para analisar a representabilidade da luz natural, sobre a iluminação artificial, os pontos definidos foram posicionados em diferentes distâncias da janela, conforme mostra a Figura 20, e foram realizadas medições em diferentes horários do dia.

A partir dos valores obtidos será feita uma média a ser considerada para a iluminância de todo o ambiente. Exatamente o mesmo procedimento de medição de iluminância foi realizado novamente após as fases seguintes da implementação do novo sistema, visando obter dados para a comparação de eficiência.

Figura 20 - Pontos para medição de iluminância do laboratório de eletrônica.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

3.2.2 Método de Medição do Consumo

Como se objetiva comparar a eficiência entre dois sistemas, saber quanto cada sistema consome de energia é fundamental. Para isso, foi adotado um procedimento padronizado, se baseando em situações hipotéticas de utilização do ambiente, no intuito de obter leituras com características semelhantes, visando comparações mais justas.

Figura 21 - Programador horário instalado para o acionamento da iluminação do laboratório.



Fonte: Do Autor (2020).

Antes das análises iniciais, foi instalado um programador horário (Figura 21) no lugar do interruptor, para realizar o acionamento da iluminação em horários pré determinados, simulando uma rotina de uso, e somente após, foi instalado o medidor no sistema atual. Foram escolhidos para o programador horário os seguintes períodos: 8:00 às 12:00 de manhã e 13:30 às 17:30 à tarde, de acordo com a carga horária de trabalho convencional, e à noite, das 19:10 às 22:30, simulando o horário das aulas.

O equipamento utilizado para realizar as leituras do consumo, foi o analisador de grandezas elétricas, PowerNET PQ-700 G4 (Figura 22), fabricado pela empresa IMS. Este analisador foi desenvolvido para ser a ferramenta mais completa na medição dos fenômenos ligados a qualidade de energia (IMS, 2020). Logo, além do consumo, poderá se ter conhecimento do fator de potência e distorções harmônicas dos sistemas.

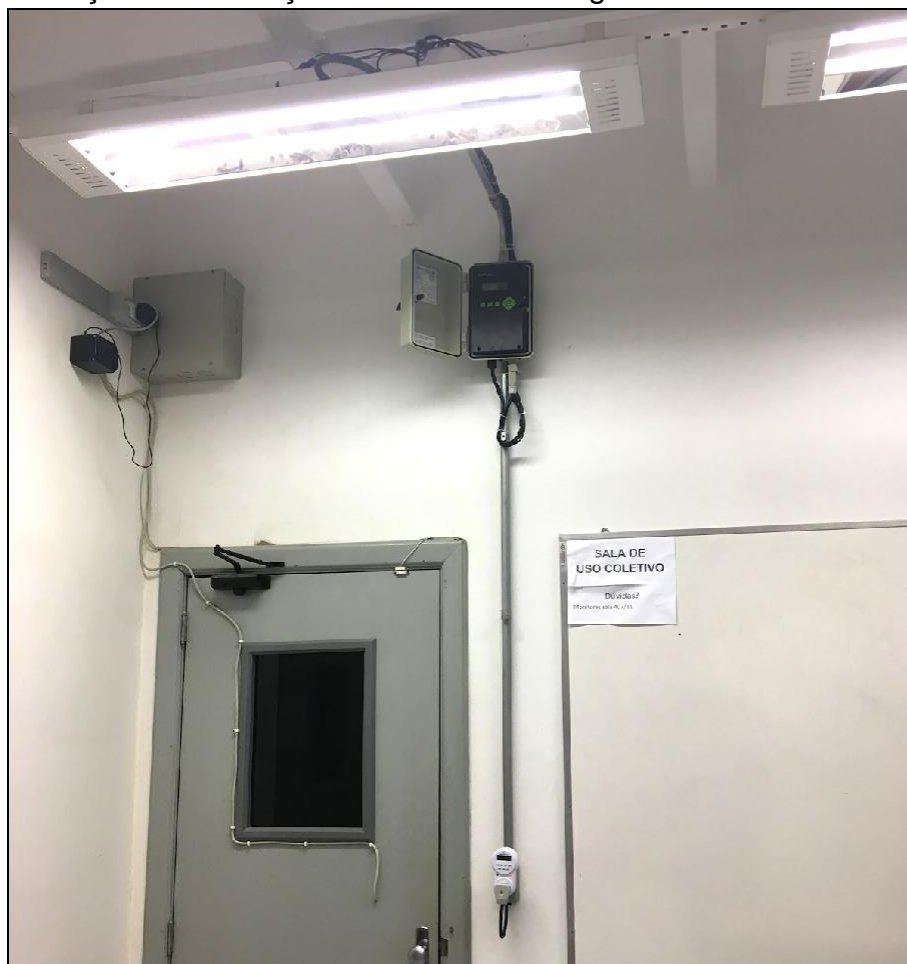
Figura 22 - Analisador de energia *PowerNET PQ700 G4*.



Fonte: Adaptado em 12/10/2020 de IMS, 2020.

O analisador foi instalado utilizando uma parametrização customizada, feita através do *software PowerManager desktop PRO*, para realizar uma medição monofásica. Para a medição do consumo o medidor foi instalado logo acima do controlador horário. Apenas um transformador de corrente (TC) foi utilizado, sendo instalado no condutor da fase do circuito de iluminação da sala. Uma das pontes do transformador de potência (TP) foi instalada na fase do circuito de iluminação, enquanto a outra no condutor neutro do sistema para, deste modo, realizar a medição individual do consumo de energia do sistema de iluminação. A Figura 23 mostra a posição de instalação do medidor no local.

Figura 23 - Posição de instalação do analisador de grandezas elétricas.



Fonte: Do Autor (2020).

Cabe ressaltar que o método de medição de consumo acima descrito, foi realizado em três etapas do processo: primeiramente considerando o ambiente em suas características atuais, após a instalação das novas lâmpadas, e após a instalação do sistema proposto, buscando dados com características de período de acionamento iguais para posteriores análises comparativas.

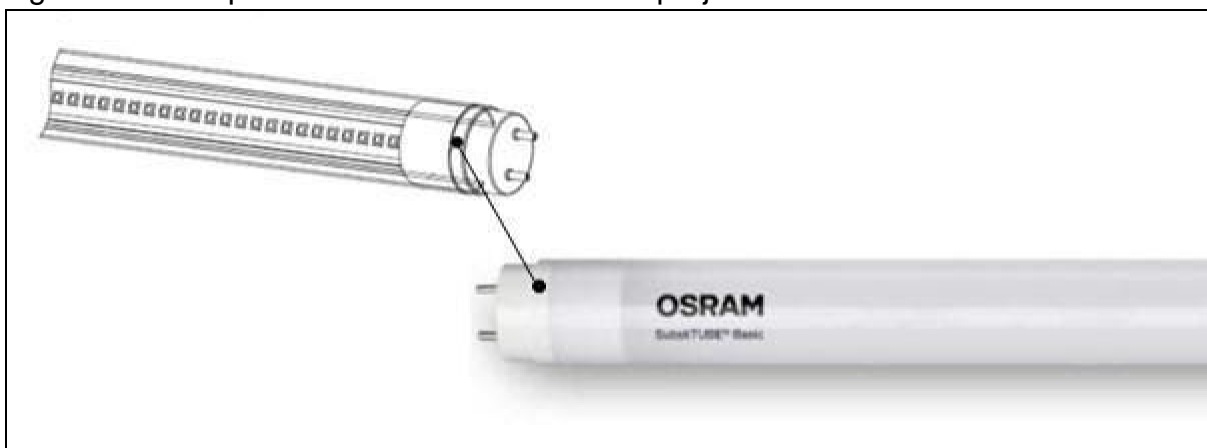
3.3 Características do Sistema de Iluminação Proposto

Para iniciar a implementação de um sistema de iluminação mais eficiente para o laboratório, é preciso realizar a substituição das antigas lâmpadas fluorescentes tubulares, por lâmpadas tubulares *LED*, de maior eficiência luminosa, conforme já comentado anteriormente. Esta etapa é uma das mais simples pois, para tal, é

necessário apenas realizar a troca das lâmpadas fluorescentes pelas suas substitutas equivalentes em *LED* e eliminar o reator eletrônico, alimentando a lâmpada com a tensão da rede.

A lâmpada escolhida para substituir a fluorescente tubular é uma lâmpada TUBO LED ST8-HB4 18W/840 (Figura 24), também da fabricante Osram, com potência nominal de 18 W e fator de potência de 0,9. Esta lâmpada possui vida útil nominal de 40.000 horas, e é capaz de produzir um fluxo luminoso de 1900 lm, sendo assim, sua eficiência luminosa superior à 105 lm/W (OSRAM, 2019).

Figura 24 - Lâmpada tubular *LED* utilizada no projeto.



Fonte: Adaptado em 12/10/2020 de OSRAM, 2019.

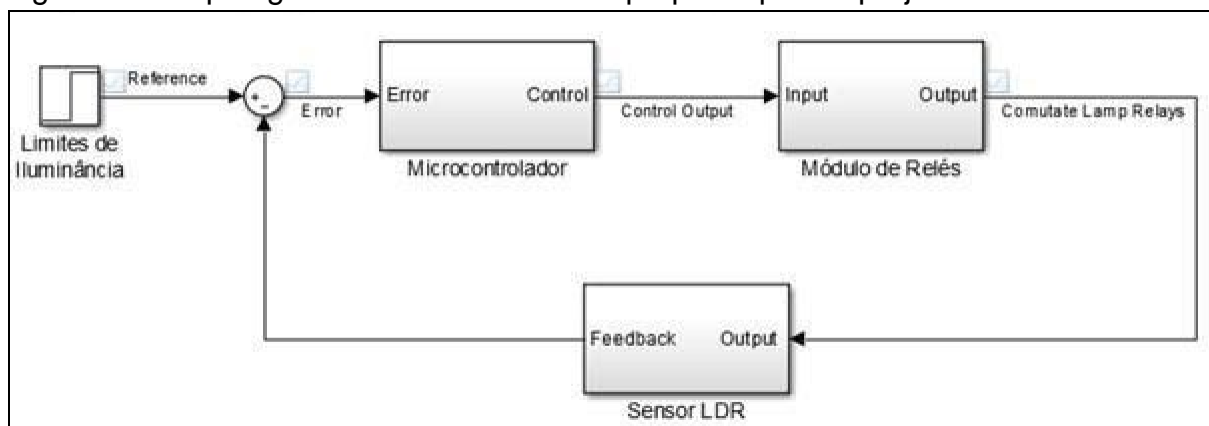
Diferente das fluorescentes, que possuem fluxo luminoso radial, estas lâmpadas possuem ângulo de abertura de $160^{\circ} \times 120^{\circ}$, isso por causa de suas características construtivas. O ângulo de abertura se deve ao fato das lâmpadas tubulares em *LED* possuírem uma fita no interior do seu tubo, conforme mostra a Figura 21, projetando a luminosidade para apenas uma direção.

3.4 Implementação do Sistema de Controle

Após se ter segurança de que as novas lâmpadas atendem os níveis mínimos de iluminância em todas as condições da iluminação natural do ambiente, o próximo passo foi a implementação da lógica de controle, utilizando o microcontrolador, que fez a comutação, através do módulo de relés, das lâmpadas individualmente, usando o módulo foto sensor *LDR* de referência, se baseando pela iluminância do ambiente.

O controle é muito simples, baseando-se em uma malha fechada, onde foi determinado o valor mínimo de iluminância do ambiente, de acordo a norma NBR-ISO CIE8995-1-2013, e uma histerese, tendo em vista evitar oscilações indesejadas. A realimentação do sistema é feita pelos sensores fotoelétricos *LDR*, posicionados estrategicamente, em pontos com diferente incidência da luz natural, com o objetivo de controlar cada luminária individualmente, assim tornando o sistema mais preciso. A topologia da malha de controle pode ser vista na Figura 25 abaixo:

Figura 25 - Topologia da malha de controle proposta para o projeto.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

3.4.1 Controle Automatizado do Acionamento Através de um Microcontrolador

Para realizar o controle, ou seja, o chaveamento automatizado das lâmpadas, primeiramente foi definido o controlador a ser empregado no processo. Devido à facilidade de integração com os demais componentes, foi escolhido o Arduino Uno R3, que é uma plataforma aplicada com microcontrolador. Esta plataforma utiliza o microcontrolador *ATmega328*, desenvolvido pela antiga Atmel, atual *Microchip*, que é um microcontrolador AVR de 8 *bits*, com arquitetura *Harvard* modificada, de alta performance. Este microcontrolador pertence à família AVR da Atmel, e sua nomenclatura, ATmega328, é dada devido ao microcontrolador possuir uma memória flash de 32K *bytes* e trabalha com 8 bits (ATMEL, 2015).

A plataforma Arduíno é um projeto que engloba *software*¹⁴ e *hardware*¹⁵, que objetiva fornecer uma ferramenta fácil para prototipação de projetos, através de um microcontrolador. Nele o *software* interage diretamente com o *hardware*, possibilitando integrar sensores, motores e outros dispositivos eletrônicos, diretamente ou com o uso de *shields*¹⁶. O microcontrolador é programável usando a linguagem própria do Arduino (baseada em C/C++) além de também aceitar código diretamente em C/C++ (JUSTEN; ÁLVARO, 2011).

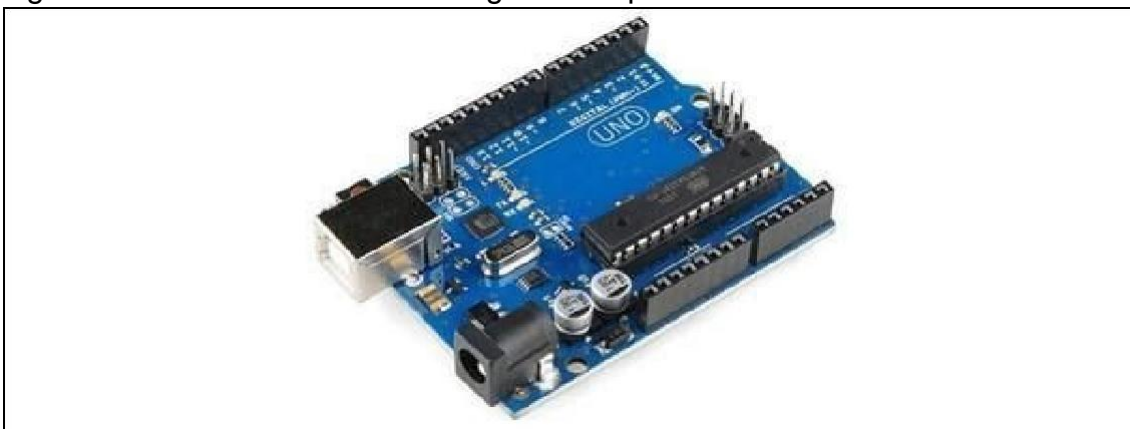
Ele possui 11 pinos digitais que podem ser configurados para operar tanto como entrada quanto saída, sendo 6 deles com possibilidade de ser saídas *PWM*, além de 6 entradas analógicas, um cristal com oscilação de 16MHz, uma conexão USB, uma entrada para fonte externa, e um botão de reinício. A Figura 26 mostra o microcontrolador já na plataforma do Arduino Uno.

¹⁴ *Software*, do inglês, é como se denominam os programas de computadores (COLLINS DICTIONARY, 2020).

¹⁵ Em oposição à *software*, derivado do inglês, *Hardware* refere-se à própria máquina (COLLINS DICTIONARY, 2020).

¹⁶ Um *Shield* é uma placa de circuito impresso que se encaixa diretamente nos conectores da placa do Arduíno. Sua função é aumentar as funcionalidades do Arduíno, como por exemplo, acionar cargas maiores, ou até acrescentar um display ao microcontrolador (NOVA ELETRÔNICA, 2019).

Figura 26 - Microcontrolador Atmega238 na plataforma do Arduino Uno R3.



Fonte: Adaptado em 28/09/2019 de <<http://uploads.filipeflop.com/2017/07/1AC01-9-1-600x600.jpg>>.

3.4.2 Chaveamento de Luminárias Utilizando Módulo de relés

Uma maneira eficiente de realizar a variação de iluminância do ambiente é fazer o chaveamento individual das lâmpadas ou de cada luminária. Como a sala possui 8 luminárias, adotando o chaveamento individual por luminária, existe a possibilidade de variar a luminosidade em degraus de 12,5% na iluminação do ambiente.

Para executar este chaveamento, foi utilizado um módulo de relés (Figura 27). Este módulo possui 8 canais, e é alimentado com 5 Volts, podendo ser integrado diretamente ao microcontrolador. Além disso, de acordo com o *datasheet*¹⁷ os contatos de cada relé tem capacidade de suportar uma tensão de até 250 Volts e 10 Ampéres em corrente alternada, atendendo com bastante folga a carga das lâmpadas que é de aproximadamente 0,2 Ampéres por luminária, ou seja, 0,4 Ampéres por canal. Contudo seu uso é necessário em função da tensão de alimentação, que é de 220 Volts.

¹⁷ Para componentes eletrônicos *datasheet* é o documento que traz as especificações de um produto em particular (OXFORD; LEXICO, 2020).

Figura 27 - Módulo de relé utilizado para o chaveamento das lâmpadas



Fonte: Adaptado em 01/11/2019 de <<https://www.eletrogate.com/modulo-rele-8-canais-5v>>.

3.4.3 Leitura da Iluminação via Módulo de Sensor LDR

O módulo do sensor utilizado no projeto (Figura 28), funciona com alimentação de 3,3 à 5 Volts, podendo ser conectado diretamente a um microcontrolador, como é o caso do ATmega328. Este módulo em específico possui um circuito integrado (CI) comparador de tensão LM393, usado para acionar uma saída digital. Além desta, o sensor possui uma saída analógica, a qual varia de acordo com a resistência do *LDR*, ou seja, sinal respectivo à iluminância do ambiente (ARDUÍNO E CIA., 2014).

Figura 28 - Módulo do sensor *LDR* para medição da luminosidade.



Fonte: Adaptado em 01/11/2019 de <<https://uploads.filipeflop.com/2017/07/1-6.png>>.

Para que o sensor funcione corretamente, foi necessária a instalação dele no ambiente, para então realizar sua calibração utilizando o luxímetro digital. Somente após isso, será possível receber o valor da iluminância no microcontrolador, e por fim realizar o chaveamento das lâmpadas.

Como a sala possui área relativamente pequena, e se deseja obter iluminância níveis de iluminância mínimos em toda ela, serão utilizados quatro sensores *LDR*, para realizar o controle individualizado de cada luminária, posicionados conforme as medições realizadas com o luxímetro (Figura 19). Além disso, como o sensor varia a sua resistência em relação à iluminação, todos os sensores foram ligados no microcontrolador utilizando o mesmo comprimento de cabo, de modo a obter os mesmos valores na sua saída analógica, para distâncias diferentes.

Pelo sinal de saída dos sensores *LDR* não possuir variação linear em relação à iluminância medida com o luxímetro, foram definidos valores de *setpoint* e histerese para o sistema de maneira empírica, com o objetivo de atender os níveis de iluminância mínimos em todas as condições externas, efetuando o desligamento de luminárias de maneira correta, quando necessário, e garantindo estabilidade para o sistema de controle.

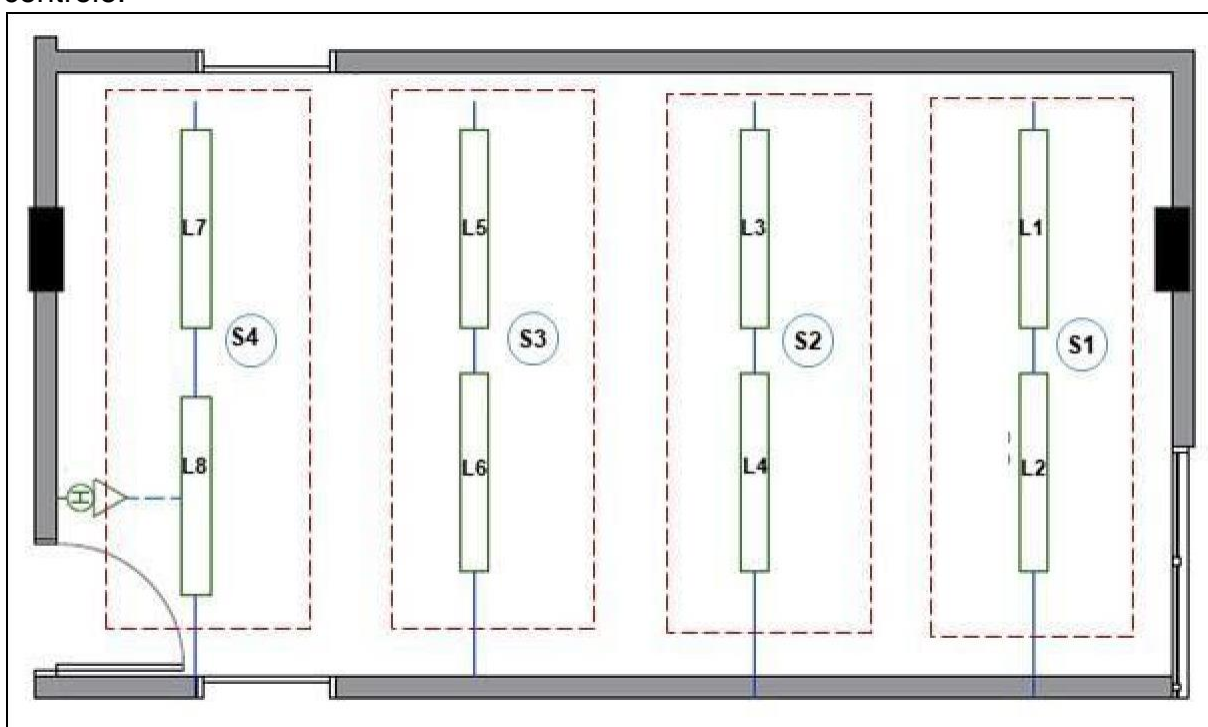
3.4.4 Lógica de Controle de Acionamento Utilizada

Por fim, para definir como seria feito o controle do sistema, foram analisadas as condições e variáveis disponíveis. O objetivo do sistema é buscar a eficiência através da possibilidade de variação do número de luminárias acesas, de acordo com a iluminação natural disponível no ambiente.

Para possibilitar esta variação, foi implementado o módulo de relés com oito saídas (Figura 27), de modo a poder acionar cada luminária individualmente, diferente do sistema antigo, no qual só existia a possibilidade de acionar todas as luminárias. A partir da possibilidade de variação, adotou-se quatro módulos de sensor *LDR* (Figura 28), para poder assim ter um sinal de referência da iluminação, que é o variável que se deseja controlar.

Tendo a possibilidade de variação, e um sinal de referência, foi então desenvolvida uma lógica para o controle do sistema de iluminação. Cada um dos sensores foi instalado no perfilado entre duas luminárias, deste modo, para o controle de cada par de luminárias, foi considerado o valor lido pelo sensor entre elas, conforme a Figura 29. Assim foi executado o controle individual por fileira, seguindo uma ordem de prioridade para o acionamento e desacionamento das luminárias, conforme ANEXO B.

Figura 29 - Disposição dos sensores e luminárias de acordo com referência do controle.



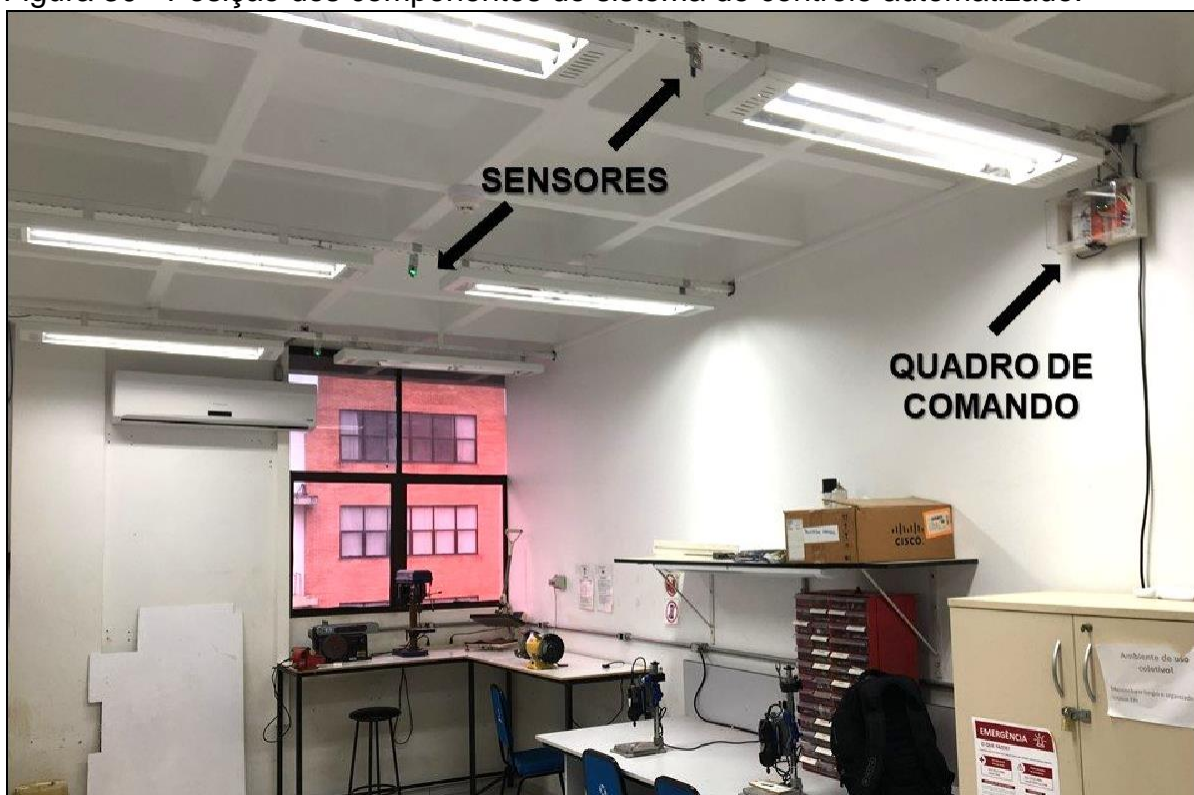
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Na figura acima (Figura 29) os sensores foram representados com a denominação “S1”, “S2”, “S3” e “S4”. Enquanto as luminárias foram denominadas “L1”, “L2”, “L3”, “L4”, “L5”, “L6”, “L7” e “L8”, cada grupo de acionamento, que corresponde às luminárias e respectivo sensor, encontra-se representado através de um quadro pontilhado vermelho.

3.4.4 Sistema de Controle Montado

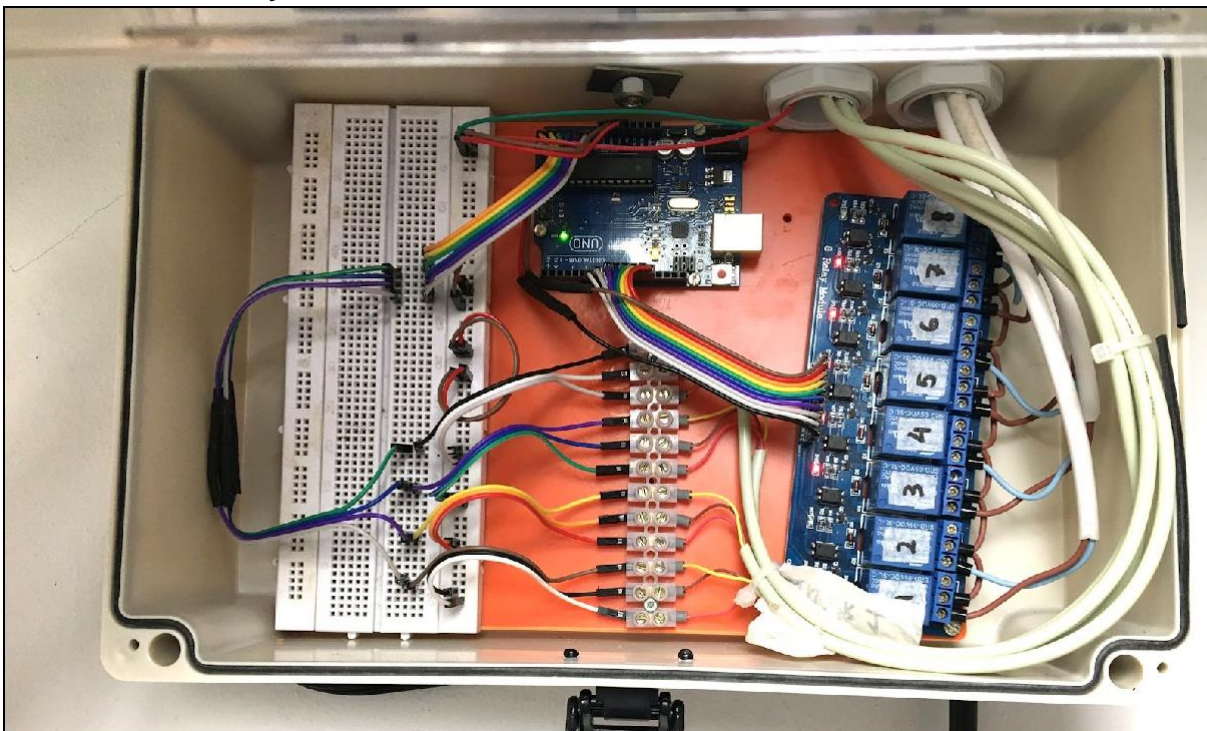
Nas imagens a seguir é possível observar a posição de instalação dos componentes do sistema, o quadro de comando montado e o detalhe da adaptação realizada no módulo de sensor, para fixá-lo ao perfilado.

Figura 30 - Posição dos componentes do sistema de controle automatizado.



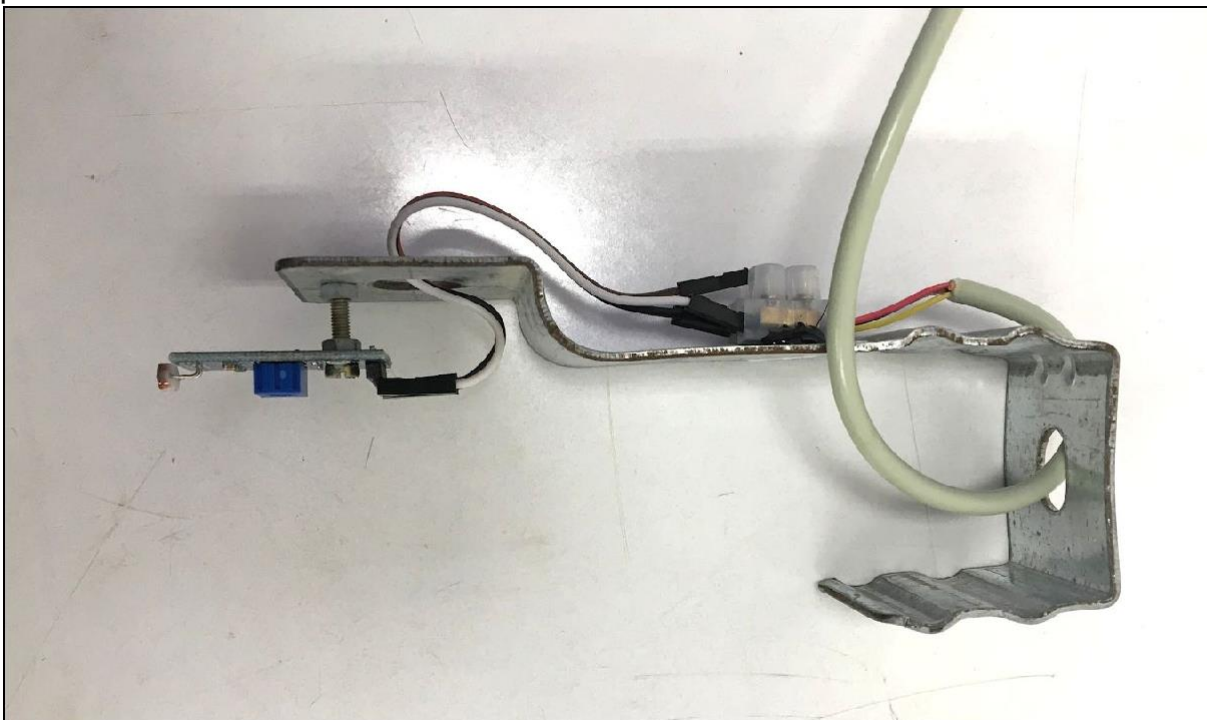
Fonte: Do Autor (2020).

Figura 31 - Quadro de comando implementado para o controle automatizado do sistema de iluminação.



Fonte: Do Autor (2020).

Figura 32 - Adaptação realizada em módulo de sensores *LDR* para fixá-lo em perfilado existente.



Fonte: Do Autor (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização dos procedimentos metodológicos supracitados no Capítulo 3, foi possível coletar dados das diferentes etapas de implementação deste sistema de controle automatizado. Diante disso, a etapa subsequente deste trabalho é analisar as informações obtidas e observar os impactos das alterações propostas, bem como o comportamento do sistema em suas diferentes fases.

A seguir serão descritos os resultados dos procedimentos desde as medições do sistema existente até o comparativo de dados entre as diferentes possibilidades de implementação do sistema proposto, visando-se justificar a viabilidade do mesmo de forma econômica e prática.

4.1 Análise do Sistema de Iluminação Antigo com Lâmpadas Fluorescentes

O ponto de partida das análises foi a realização das medições de iluminância e das características elétricas do sistema de iluminação existente. Tendo em vista que se deseja comparar eficiências entre sistemas distintos, é importante ter dados de ambos, seguindo os procedimentos metodológicos citados no capítulo anterior. A seguir serão mostrados os resultados das coletas de dados que antecederam as intervenções realizadas no sistema de iluminação.

4.1.1 Iluminância do Sistema de iluminação com Lâmpadas Fluorescentes

Antes de realizar a troca das lâmpadas do sistema de iluminação antigo do ambiente onde este trabalho de monografia foi desenvolvido, foi feita a medição da iluminação, com o auxílio de um luxímetro digital, conforme citado anteriormente, nas metodologias.

Esta etapa teve por intuito atestar se o sistema existente atendia os níveis mínimos de iluminância, conforme as diretrizes da NBR ISO/CIE 8995-1:2013. Ainda para possibilitar um parâmetro de comparação entre o sistema de iluminação antigo e novo a ser instalado, foi feita a medição da iluminação, com o auxílio de um luxímetro digital, conforme descrito anteriormente.

Através desta medição, foram obtidos valores médios de iluminância, para cada um dos pontos conforme indicado na Figura 20, e que podem ser vistos na tabela a seguir.

Tabela 2 - Valores de iluminância do sistema de iluminação anterior a troca das lâmpadas.

Ponto de medição	Iluminância (Lux)	Adequado
1	337	Não
2	661	Sim
3	677	Sim
4	682	Sim

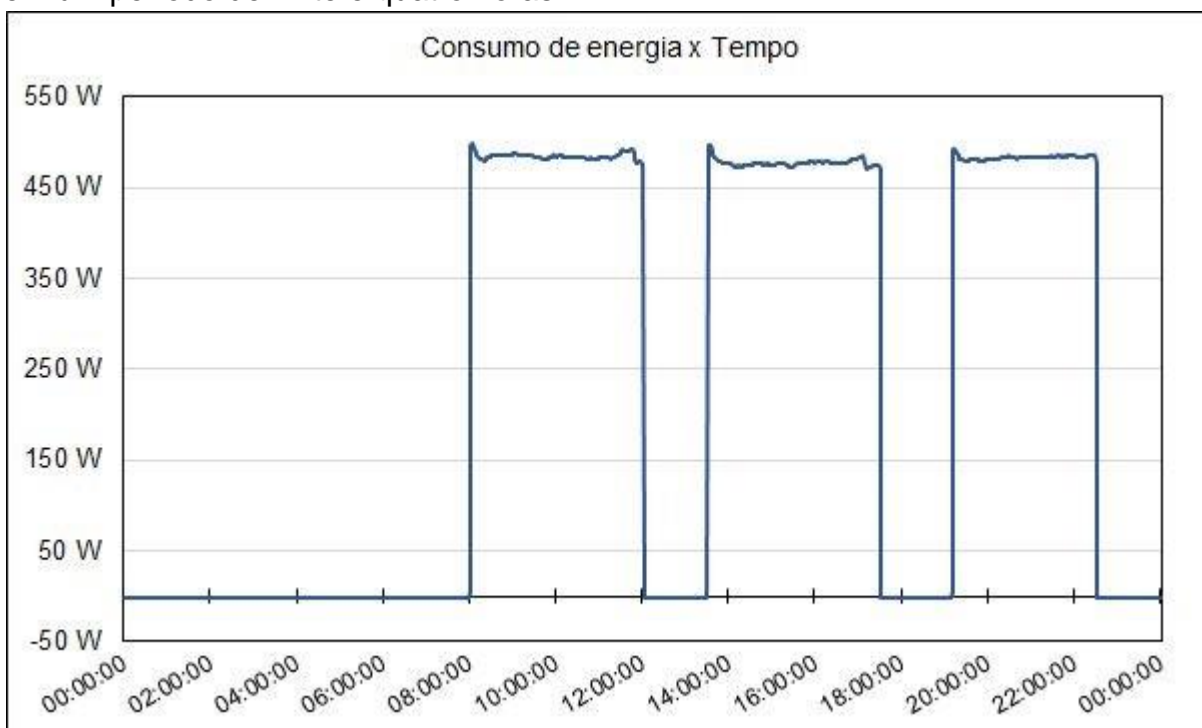
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A partir dos dados da Tabela 2, é possível perceber que o sistema antigo de iluminação da sala atendia parcialmente ao valor mínimo de 500 lux, exigidos pela norma NBR ISO/CIE 8995-1:2013, como mostra o ANEXO A. O valor abaixo do mínimo, de 337 Lux, encontrado no ponto de número 1 se deve ao fato de que uma das lâmpadas da luminária L7 (Figura 29) queimou durante o andamento deste trabalho, para tanto, os valores de consumo de energia também foram afetados.

4.1.2 Consumo do Sistema de Iluminação Existente com Lâmpadas Fluorescentes

Ainda antes de realizar a substituição das antigas lâmpadas fluorescentes tubulares de 32W, foi feita a medição do consumo de energia elétrica pelo sistema antigo, utilizando o analisador de energia PowerNet PQ700 G4 da IMS (Figura 22), obtendo-se os dados que constam no gráfico abaixo. Para facilitar a visualização, foi selecionado para compor o gráfico da Figura 33, um intervalo de tempo de 24 horas, período no qual o sistema de iluminação consumiu um total de 5,23 kW/h, permanecendo 11 horas e 20 minutos ligado, conforme programação ajustada. A potência média para o período analisado ficou em aproximadamente 490W.

Figura 33 - Gráfico do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação antigo em um período de vinte e quatro horas.



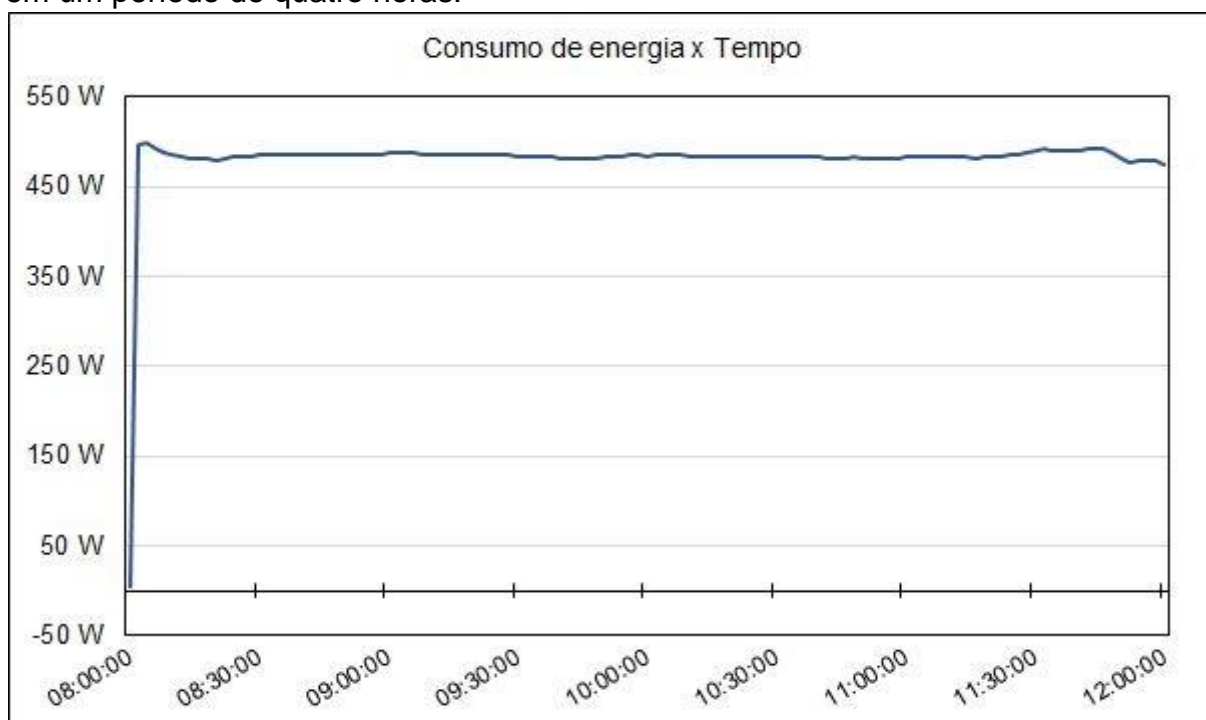
Fonte: Elaborado com dados obtidos com o Qualimetro (2020).

Ainda considerando os dados da medição de energia elétrica realizada no período anterior a troca das lâmpadas do sistema de iluminação antigo do ambiente, o qual utilizava lâmpadas fluorescentes com acionamento por reator eletrônico, foi possível observar que o fator de potência (FP) da carga ficou estável no valor de

0,99 indutivo. O fator de potência elevado é muito benéfico para instalações elétricas, pois assim, não há necessidade de fazer compensações através de bancos de capacitores.

O fator de potência baixo indica que a energia está sendo mal aproveitada, devido ao alto índice de reativos, e a não compensação do fator de potência pela unidade consumidora, quando em valores abaixo de 0,92, acarreta em tarifa de energia reativa excedente, aplicada à título de multa em consumidores com carga instalada acima de 75 kW (MONQUEIRO; JÚLIO C. B., 2018)

Figura 34 - Gráfico do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação antigo em um período de quatro horas.



Fonte: Elaborado com dados obtidos com o Qualimetro (2020).

Através destes dados ainda é possível perceber que, como o circuito não possui mais de um interruptor ou possibilidade de variação da quantidade de lâmpadas acesas ou intensidade, o circuito apresenta apenas uma pequena variação na potência, logo em que é feito o acionamento, relacionada à partida do conjunto reator e lâmpadas. O gráfico da Figura 34 acima evidencia claramente o comportamento da carga, em um período de 4 horas, correspondente ao turno da manhã.

A eficiência de lâmpadas é dada em lúmens por watt (lm/W), porém através de uma conta de divisão do valor de iluminância média medida no local (Tabela 2), pela média da potência consumida pelo sistema, que foi de 487,9 W, é possível obter um valor que relaciona o fluxo luminoso e a energia consumida pelo sistema de iluminação, podendo ser o indicador de eficiência entre os diferentes sistemas de iluminação. Para o sistema antigo, o valor calculado da eficiência foi de 1,21 Lux/W.

4.2 Análise do Sistema de Iluminação Após Substituição das Lâmpadas Fluorescentes por *LED*

Após a coleta de dados do sistema com as lâmpadas fluorescentes, foi realizada a substituição destas por lâmpadas tubulares *LED* equivalentes. As lâmpadas fluorescentes de 32W foram substituídas por novas, de 18W, fazendo-se a remoção dos reatores eletrônicos e alimentando as lâmpadas com a tensão de rede. Novamente foram coletados os dados da iluminância e das grandezas elétricas do sistema de iluminação, e estes resultados serão apresentados a seguir.

4.2.1 Iluminância do Sistema de iluminação com Lâmpadas *LED*

Posteriormente à troca das lâmpadas fluorescentes de 32W do sistema de iluminação do ambiente pelas novas lâmpadas *LED* tubulares de 18W, foram refeitas as medições de iluminância, seguindo os mesmos procedimentos metodológicos já descritos neste trabalho e utilizando o mesmo luxímetro digital, mostra na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de iluminância do sistema de iluminação posterior a troca das lâmpadas por *LED*.

Ponto de medição	Iluminância (Lux)	Adequado
1	835	Sim
2	854	Sim
3	845	Sim

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Através dos valores médios resultantes das medições de iluminância do ambiente após a troca das lâmpadas, é possível observar um aumento considerável nos níveis de iluminância, ficando agora com o valor médio desta cerca de 45% maior do que as medições realizadas anteriormente e aproximadamente 70% superior ao valor mínimo de 500 Lux, estipulado na norma NBR ISO/CIE 8995-1:2013, para o ambiente analisado. Vale ressaltar que no sistema antigo, posterior a troca das lâmpadas, um dos pontos apresentou inconformidade à norma citada.

A partir dos dados apresentados na Tabela 2 e na Tabela 3, é interessante observar que, de acordo com os catálogos do fabricante das duas lâmpadas utilizadas no trabalho, a lâmpada fluorescente tubular apresenta maior fluxo luminoso nominal que a tubular *LED*, o que seria compreensível, pois a potência da lâmpada *LED* é bastante inferior. As fluorescentes de 32W têm fluxo luminoso nominal de 2350 lm, enquanto que as suas substitutas em *LED*, de 18W, são capazes de produzir um fluxo luminoso de 1900 lm.

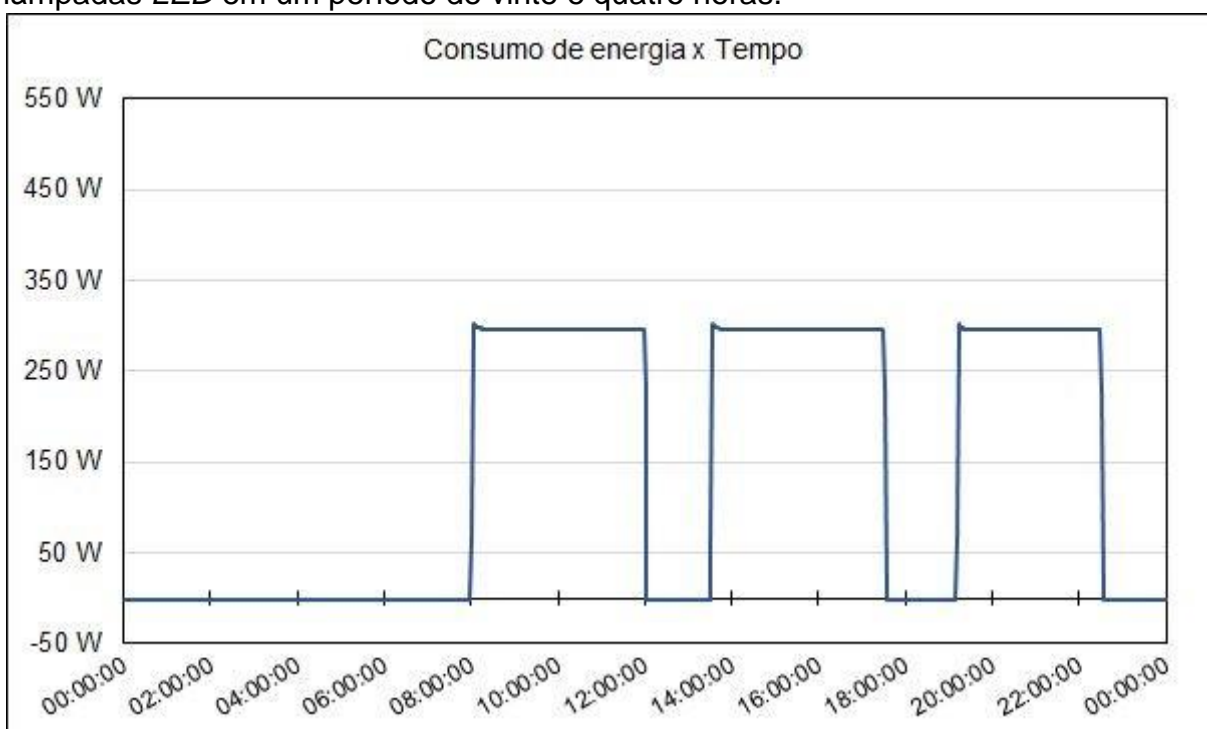
Um fator que pode ter influenciado na diferença obtida entre a iluminância da lâmpada fluorescente e da *LED*, é pelo fato de as primeiras serem pré-existentes no local e, por isso, podem ter sido utilizadas por um tempo bem próximo ao da sua vida útil, o que explicaria o fato de algumas lâmpadas apresentarem a queima durante o andamento do estudo, o que se reflete ainda, na redução da eficiência luminosa pelo envelhecimento dos gases inertes e do pó fluorescente em seu interior.

Outro fator que se deve levar em consideração, é que as lâmpadas *LED* apresentam fluxo menos difuso, devido ao seu ângulo de abertura de 160°x120° (dados disponibilizados pelo fabricante), se comparado ao fluxo luminoso de uma lâmpada fluorescente, que se espalha radialmente. Isso faria com que o valor medido nos pontos determinados fossem maiores para as *LED* em relação às fluorescentes.

4.2.2 Consumo do Sistema de iluminação com Lâmpadas *LED*

Assim como realizado com as medições de iluminância, as medições de consumo de energia elétrica após a substituição das lâmpadas também foram realizadas novamente, seguindo os mesmos procedimentos metodológicos, agora com as novas lâmpadas *LED* de 18W instaladas no ambiente. Considerando os mesmos moldes do Gráfico 1, para facilitar a compreensão, o gráfico da Figura 35 a seguir, mostra o comportamento da carga do sistema de iluminação em um espaço de tempo de 24 horas, onde é possível observar a potência elétrica do conjunto de lâmpadas do sistema de iluminação.

Figura 35 - Gráfico do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação com lâmpadas *LED* em um período de vinte e quatro horas.



Fonte: Elaborado com dados obtidos com o Qualimetro (2020).

Realizando a relação entre a iluminância média dos valores obtidos (Tabela 3), dividida pela média da potência consumida pelo novo sistema, de 292,2 W, conforme realizado para a situação anterior, foi possível obter o valor da eficiência do sistema de iluminação, que foi de 3,21 Lux/W.

Além disso, comparando os valores de consumo de energia elétrica entre as duas tecnologias de lâmpadas abordadas, considerando os registros de um período de uma semana, obtidos através do analisador de grandezas elétricas, com acionamentos diários, em horários padronizados ajustados através um controlador horário, conforme indicado na Figura 33 e 35, foi possível estimar a redução do consumo devido a adoção das lâmpadas mais modernas. Os valores obtidos para as duas tecnologias de lâmpadas empregadas encontram-se na Tabela 4, para comparação.

Tabela 4 - Comparativo entre os sistemas de iluminação do ambiente analisados com as diferentes tecnologias de lâmpadas.

Lâmpada	Iluminância Média (Lux)	Potência Média (W)	Eficiência (Lux/W)	Consumo Mensal (kW)
Fluorescente	589,25	487,93	1,21	165,90
LED	849,24	291,10	2,92	98,97

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

A partir destes dados, já é possível observar uma redução do consumo de aproximadamente 40%, enquanto que os níveis de iluminância tiveram aumento de quase 60%, ambos em relação ao sistema de iluminação anterior. Vale ressaltar que, caso o sistema anterior tivesse todas as suas lâmpadas funcionando, os percentuais de diferença entre os sistemas seriam distintos, pois o consumo e a iluminância do sistema de iluminação antigo, com as lâmpadas fluorescentes, seriam maiores. Em contrapartida, o fator de potência da carga das novas lâmpadas é mais baixo, cerca de 0,94 e, diferente das fluorescentes, com característica capacitiva.

4.3 Implementação do Sistema de Iluminação Automatizado

Após as análises realizadas com as diferentes tecnologias de lâmpadas empregadas, a próxima fase foi a implementação do sistema de controle da iluminação. Com o intuito de reduzir o consumo de energia elétrica do sistema de iluminação, objetivou-se realizar o acionamento de um menor número de luminárias,

usando de referência a luminosidade do ambiente e um *setpoint*¹⁸ mínimo, baseado na norma da ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013, gerando economia através do melhor aproveitamento da iluminação ambiente e do acionamento apenas da iluminação artificial necessária.

4.3.1 Iluminância do Sistema de iluminação Automatizado

A última análise realizada nesta etapa foi em relação ao sistema de iluminação utilizando lâmpadas *LED* juntamente com a implementação do controle através do microcontrolador ATmega328, que possibilitou o chaveamento individualizado das luminárias através do módulo de relés, para que assim fosse possível analisar a variação da luminosidade em função da iluminação natural.

Como o sistema de iluminação implementado dispõe da possibilidade de variar o número de luminárias acionadas de acordo com a demanda do ambiente, a qual é interpretada pelo microcontrolador através da leitura dos sensores espalhados pelo ambiente, os níveis de iluminância variaram ao longo dos dias. Para poder avaliar o desempenho deste controle, foram feitas medições de iluminância em horários pré-determinados, para observar como o sistema variou ao longo do dia, e também para relacioná-la com o consumo de energia, obtendo o valor da eficiência do sistema.

Tabela 5 - Valores médios de iluminância do sistema de iluminação em cada turno programado posterior a implementação do controle automatizado.

Ponto de medição	Iluminância (Lux)			Adequado
	Manhã	Tarde	Noite	
1	541	528	755	Sim
2	867	836	743	Sim
3	858	809	761	Sim
4	545	537	767	Sim

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

¹⁸ *Setpoint*, derivado do inglês, significa ponto de ajuste de determinado processo (COLLINS; DICTIONARY, 2020).

Conforme a Tabela 5, os valores de iluminância não foram constantes ao longo do dia, apresentando variações entre cada turno em que as leituras foram realizadas. Entretanto, em nenhuma das situações houve níveis de iluminância abaixo do mínimo estipulado pela norma NBR ISO/CIE 8995-1:2013. Isso mostra que o sistema automatizado de fato, fez com que a iluminação atendesse às necessidades do ambiente, promovendo o conforto dos usuários.

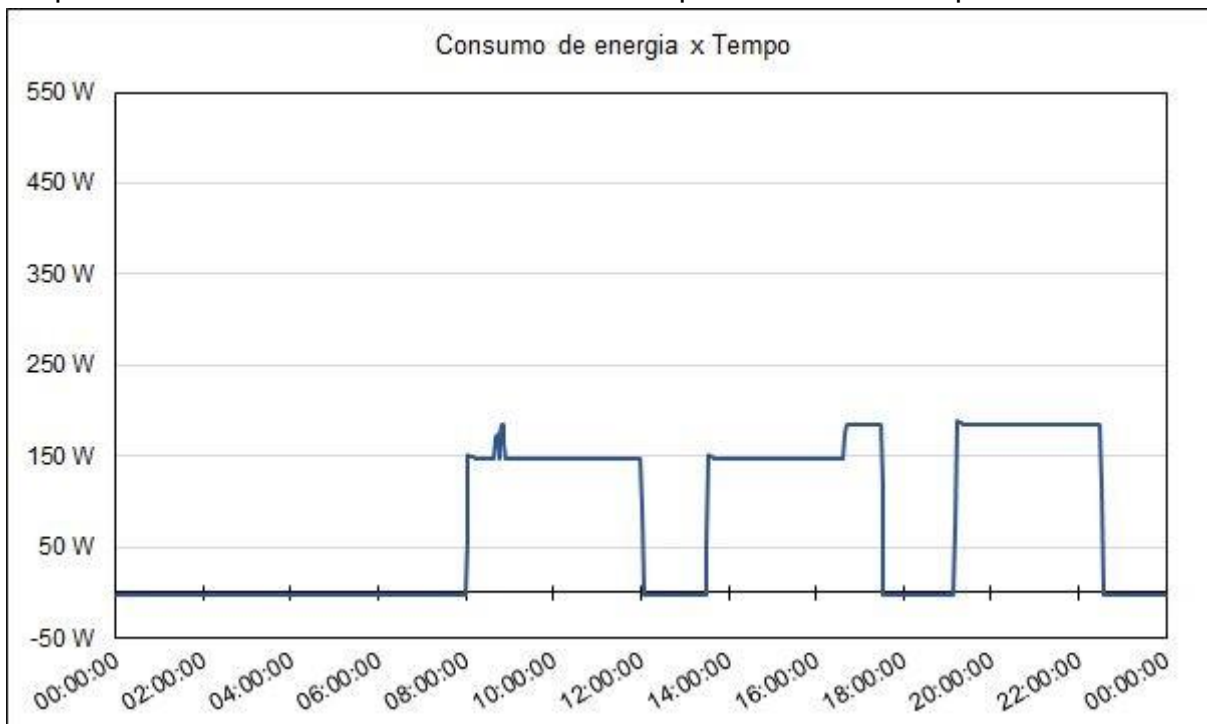
4.3.2 Consumo do Sistema de Iluminação Automatizado

A última medição de consumo realizada foi para o sistema de iluminação com lâmpadas *LED* e o controle automatizado no acionamento das luminárias. Diferente das demais medições de consumo mostradas até então, onde o consumo de energia elétrica pela carga acionada era praticamente constante, as medições para esta última etapa da análise mostram comportamento distinto, tendo variações da potência em virtude do acionando de diferentes números de luminárias ao longo do dia, conforme a incidência de luz natural.

No Gráfico 4, observa-se que o comportamento da carga no período de 24 horas, desde o acionamento até o final da tarde do mesmo dia, a potência demandada pelo sistema de iluminação da sala foi de aproximadamente 150W, o que corresponde a cerca de 50% da potência nominal das 16 lâmpadas instaladas. Após o fim da tarde, por volta das 17:00 horas, a potência consumida sobe para 185W, e permanece, até o fim do horário programado, recrutando apenas 65% da potência instalada em iluminação.

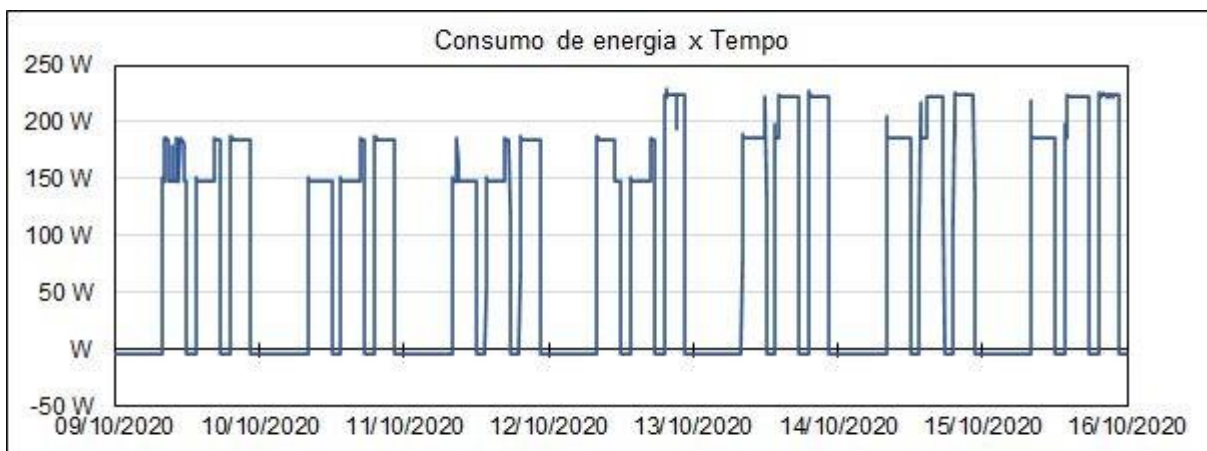
A partir do gráfico (Figura 36), também é possível perceber que o sistema apresentou poucas oscilações, o que poderia ocorrer devido a lógica de controle simples. Isto indica que o valor de histerese adotado para o sistema foi adequado. Apesar de ainda ocorrerem, como por exemplo, entre as 8:00 e 10:00 horas, estas oscilações não são constantes, o que não seria desconfortável ao usuário, e tentou-se evitar com o uso da histerese. Esta variação no acionamento ainda pode estar atrelada a um possível sombreamento, ou alguma variação na luz do dia.

Figura 36 - Gráfico do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação com lâmpadas *LED* e controle automatizado em um período de vinte e quatro horas.



Fonte: Elaborado com dados obtidos com o Qualimetro (2020).

Figura 37 - Gráfico do Comportamento da potência da carga no período de uma semana.



Fonte: Elaborado com dados obtidos com o Qualimetro (2020).

O gráfico da Figura 37, por sua vez, apresenta o comportamento do sistema no período de uma semana inteira, onde podem ser notadas ainda algumas oscilações, mas pouco recorrentes. Além disso, é possível observar também o

surgimento de uma tendência na potência demandada pelo sistema, o que indica que o controle realizou um acionamento das cargas (as luminárias), muito semelhante ao mostrado no Gráfico 4, nos demais dias da semana.

Como este caso mostra variações em função da disponibilidade de iluminação natural, tendo esta um comportamento sazonal, diretamente ligado à respectiva hora do dia, foi realizado o cálculo da média da potência e o somatório do consumo de energia elétrica para cada um dos intervalos de acionamento do sistema de iluminação, separando os valores obtidos no período da manhã, tarde e noite. Os valores obtidos estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Consumo de energia elétrica do sistema de iluminação e média da potência da carga para os diferentes períodos de acionamento.

Período	Consumo (kW/h)	Percentual de Representatividade	Potência Média (W)	Percentual Carga Total
Manhã	4,78	33,17%	169,32	57,94%
Tarde	5,09	35,30%	180,19	61,66%
Noite	4,83	33,49%	204,77	70,08%

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

O consumo total registrado no período de uma semana, com acionamentos diários das 8:00 às 12:00, das 13:30 às 17:30 e das 19:10 às 22:30, foi de 14,4kW/h. Na Tabela 6, é possível observar o consumo total registrado em cada período e o percentual de representatividade em relação ao total. Vale ressaltar que, o período da manhã e tarde possuem a mesma duração, de 4 horas, enquanto que o período da noite dura apenas 3 horas e 20 minutos, tempo cerca de 17% menor, e que mesmo assim, possui representatividade praticamente igual aos outros períodos.

Através destes dados, novamente é possível realizar o cálculo da eficiência do sistema. Na tabela a seguir, são apresentadas as médias de iluminância e potência nos diferentes turnos do dia, para ser possível analisar as variações da iluminância e o número de lâmpadas acesas, e ainda a eficiência do sistema de iluminação do ambiente.

Tabela 7 - Média da potência da carga, iluminância e eficiências para os diferentes períodos de acionamento do sistema de iluminação.

Turno	Potência (W)	Iluminância (Lux)	Eficiência (Lux/W)
Manhã	169,32	703	4,15
Tarde	180,19	677	3,76
Noite	204,77	756	3,69

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Na Tabela 7, fica evidente a relação da eficiência do sistema com a incidência da luz natural, pois nos períodos onde houve iluminação do sol em abundância, foram obtidos maiores valores de eficiência. Além disso, antes da implementação do sistema de controle automatizado, somente com a troca das lâmpadas fluorescentes pelas *LEDs*, houve um aumento significativo da iluminância, ficando com valores cerca de 70% superiores aos níveis mínimos. Portanto, haveria a possibilidade de reduzir o número de luminárias ligadas, até mesmo no pior dos casos, o período da noite. Os reflexos disso, se mostram nos valores da eficiência calculados.

4.4 Comparativo Entre os Sistema Analisados

A partir de então, é realizada a comparação dos valores medidos para cada um dos sistemas. Para tanto, a Tabela 8 traz o resumo das grandezas examinadas, sendo elas a iluminância média, a potência média, a eficiência calculada a partir dos valores médios e o consumo calculado a partir das horas de acionamento diário programado, considerado 30 dias de utilização.

Tabela 8 - Comparativo entre as três diferentes etapas da implementação do sistema automatizado de iluminação do ambiente analisado.

Lâmpada	Iluminância Média (Lux)	Potência Média (W)	Eficiência (Lux/W)	Consumo Mensal (kW)
Fluorescente	589,25	487,93	1,21	165,90
<i>LED</i>	849,24	291,10	2,92	98,97
<i>LED</i> c/ automação	712,17	184,76	3,85	62,82

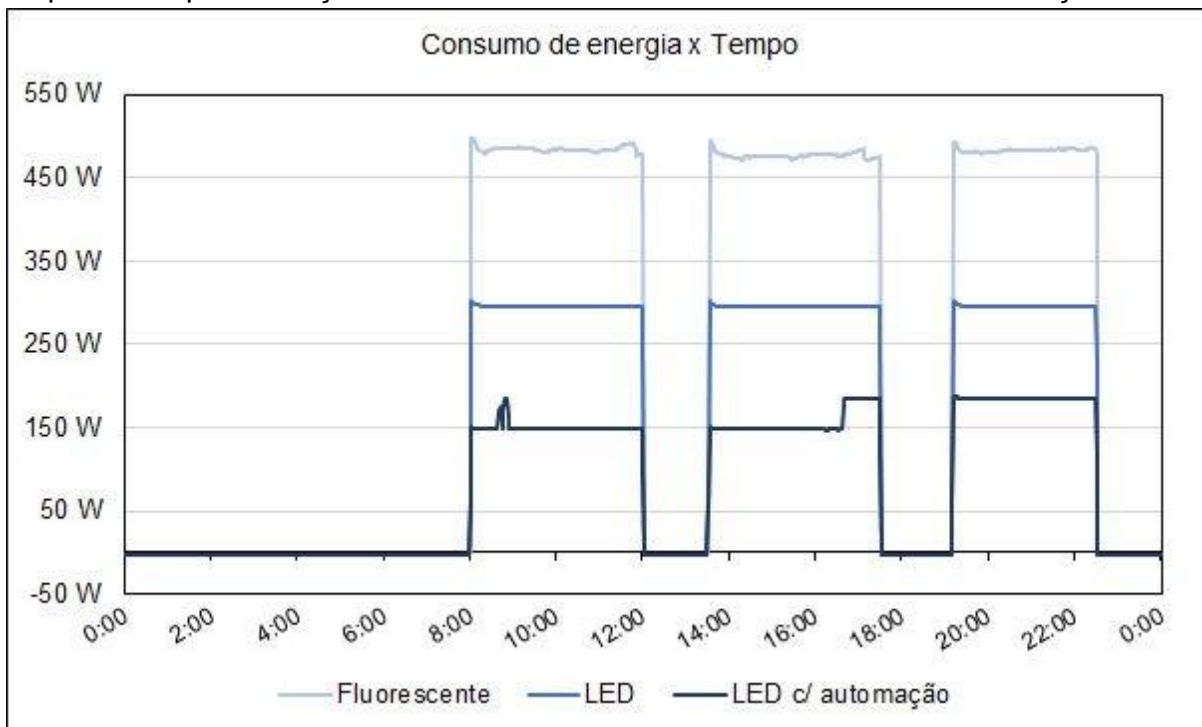
Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Este comparativo ressalta novamente a diferença significativa no consumo entre as lâmpadas fluorescentes tubulares e as *LED*. No entanto, o mais interessante a ser observado é que, após a troca das fluorescentes para as *LED*, os níveis de iluminância tiveram um aumento considerável, e com isso, o sistema iluminação do ambiente passou a entregar níveis de iluminância bem acima dos exigidos pela norma, deixando margem para aplicar o controle, e assim acionar somente a quantidade de luminárias necessária.

Como citado anteriormente, a eficiência de um sistema não compreende apenas em realizar mais, pois como visto na Tabela 8, mesmo com lâmpadas mais eficientes, haviam desperdícios em produzir maior fluxo luminoso que o necessário, desta forma, o controle automatizado do acionamento, surge como ferramenta para reduzir estes desperdícios. Pode-se observar ainda que, após a adoção do controle automatizado, os níveis médios de iluminância ainda permaneceram altos, pois durante o dia, por exemplo, a iluminação natural disponível no ambiente fez com que apenas uma parcela da iluminação artificial fosse suficiente para atender a demanda, otimizando o sistema.

O gráfico da Figura 38 ilustra a sobreposição dos gráficos anteriores, demonstrando a diferença na potência elétrica demandada ao longo de um período de 24 horas, onde fica mais evidente as mudanças do consumo entre cada etapa da implementação do sistema de controle automatizado da iluminação no ambiente.

Figura 38 - Gráfico comparativo do comportamento da carga para as diferentes etapas da implementação do sistema de controle automatizado da iluminação.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

4.5 Análise dos Aspectos Econômicos

Outro fator de grande relevância para a análise, além de comprovar a redução do consumo de energia elétrica, é avaliar os aspectos econômicos dos sistemas, e a viabilidade de aplicação de um sistema de controle, levando em consideração os custos de implementação e o *payback*¹⁹ do conjunto. A Tabela 9 apresenta as especificações dos sistemas analisados, os custos iniciais para sua instalação de acordo com os gastos tidos durante a implementação do trabalho e o custo aproximado do kWh para uma unidade consumidora do tipo comercial.

¹⁹ *Payback* é como se denomina o tempo necessário para o lucro se igualar ao gasto inicial (OXFORD; LEXICO, 2020).

Tabela 9 - Especificações técnicas e custos iniciais de instalação de cada sistema de iluminação analisado.

	FLUORESCENTE	LED	LED C/ AUTOMAÇÃO
Fabricante	Osram	Osram	Osram
Modelo	T8 FO 32W/640	ST8-HB4 18W/840	ST8-HB4 18W/840
Potência (W)	32	18	~11,3
Vida útil (horas)	20.000	40.000	40.000
Uso diário (horas)	11,33	11,33	11,33
Consumo/Mês (kW/h)	165,90	98,97	62,82
Fluxo luminoso (lm)	2350	1900	>1900
Custo da lâmpada	R\$ 6,00	R\$ 22,00	R\$ 22,00
Custo de reator	R\$ 30,00	-	-
Custo do kWh	R\$ 0,80	R\$ 0,80	R\$ 0,80
Outros custos	-	-	R\$ 588,50
Custo inicial (Total)	R\$ 336,00	R\$ 352,00	R\$ 940,50

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Os valores de potência das lâmpadas foram extraídos do catálogo do fabricante, exceto o do sistema com a automação, onde foi realizada a média da potência registrada no período. Além disso, o consumo de energia também leva em consideração os dados das medições realizadas com o qualímetro. No item “custos iniciais”, são compreendidos os valores gastos com as lâmpadas, reatores e outros custos. O item “outros custos” representa os gastos com o microcontrolador, módulo de relés, módulos de sensores, o adicional de condutores necessários para a alimentação de cada luminária individualmente, os condutores utilizados para os sensores, o quadro utilizado para acomodar o comando do sistema e outros acessórios. A vida útil das lâmpadas fluorescentes, de acordo com o catálogo do fabricante, é igual a metade da lâmpada em *LED*, portanto, nas análises considerando o *payback* até o fim da vida útil da nova lâmpada, se consideram os custos de uma troca.

Para aprofundar as diferentes possibilidades de comparação de aplicação dos sistemas analisados até aqui, em situações práticas, com o objetivo de chegar a simulações de custos em circunstâncias o mais próximo possível da realidade, foram elaborados os comparativos apresentados a seguir.

Inicialmente, foi considerada uma situação hipotética de instalação de um sistema completamente novo, dentro do qual os custos serão descritos considerando instalar tudo desde o princípio, ou seja: os gastos de viabilizar um sistema com lâmpadas fluorescentes, um sistema com lâmpadas *LED*, e um sistema de lâmpadas *LED* com automação. Realizando-se assim, um comparativo de *payback* dos dois últimos em relação ao primeiro, das lâmpadas fluorescentes.

Após, serão descritos os comparativos em uma segunda situação hipotética, a qual também representa o que foi simulado ao longo do presente trabalho, considerando-se a substituição de um sistema existente com lâmpadas fluorescentes, pela troca por sistemas com lâmpadas *LED* e lâmpadas *LED* com automação.

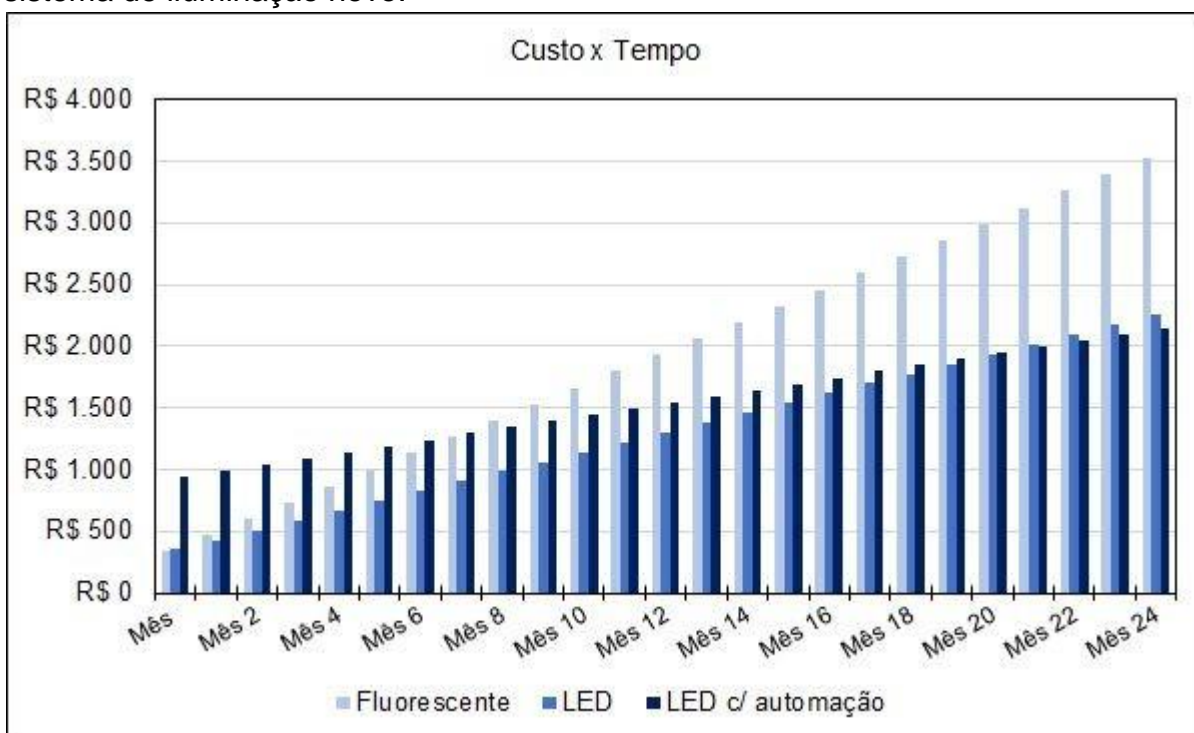
Neste segundo caso, os custos iniciais para implementação dos sistemas não são considerados, e somente a troca das lâmpadas e implementação da automação entram nas considerações. As análises de *payback* então serão: em relação à troca de lâmpadas fluorescentes por *LED*, troca de lâmpadas *LED* por *LED* com automação e por fim, um comparativo de *payback* somente em relação à implementação do sistema de automação em um sistema de iluminação com lâmpadas *LEDs*, seja ele existente ou novo.

4.5.1 Instalação de um Sistema Novo

A primeira análise a ser feita, é a do *payback* obtido para a instalação de um sistema novo de iluminação no ambiente analisado. Para realizar este estudo, é necessário antes estabelecer quais serão os parâmetros de comparação entre os sistemas.

Conforme relatado anteriormente, objetivou-se, em um primeiro momento, realizar um comparativo dos custos da implementação de um sistema novo, estimando-se o tempo de retorno dos valores da instalação de lâmpadas *LED* e do sistema de automação do acionamento, em relação à tecnologia que já era empregada no sistema de iluminação do espaço.

Figura 39 - Gráfico de análise dos aspectos econômicos na implementação de um sistema de iluminação novo.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

O gráfico (Figura 39) mostra os custos atrelados à iluminação do ambiente, que correspondem ao custo inicial e o custo da energia elétrica consumida ao longo de um intervalo de 2 anos. Pode-se observar assim, o impacto gerado na fatura de energia decorrente da adoção de lâmpadas mais eficientes e do acionamento automatizado.

4.5.1.1 Comparativo de Dados entre Fluorescente e *LED*

A primeira consideração a ser feita sobre os resultados obtidos, é em relação à escolha da tecnologia de lâmpada em função do custo inicial. Através dos dados apresentados na Tabela 9, é possível perceber que o custo inicial para a instalação é muito semelhante entre as duas tecnologias de lâmpadas analisadas, principalmente pelo preço dos reatores eletrônicos, necessário para a alimentação das lâmpadas fluorescentes.

A diferença no custo inicial entre as lâmpadas é em torno de R\$16,00, enquanto que o valor economizado em energia elétrica no primeiro mês, é de R\$53,54, considerando os custos iniciais e de energia mostrados da Tabela 9. Logo, na primeira fatura de energia, a adoção das lâmpadas *LED*, já teria um retorno de R\$37,54, em relação às lâmpadas fluorescentes. No final do período de 2 anos, mostrado no gráfico (Figura 39), a economia gerada seria de 1606,32 kWh, equivalente a R\$1.285,06, representando uma economia de R\$933,06.

4.5.1.2 Comparativo de Dados entre Fluorescente e *LED* com Automação

Em relação à implementação de um sistema de controle automatizado, que envolve um custo inicial maior, pois engloba o preço das lâmpadas e os componentes utilizados para realizar o controle, implica em um maior tempo para retorno financeiro. O preço total da implementação do sistema de iluminação com lâmpadas *LED* e controle do acionamento automatizado foi de R\$940,50, apresentando uma diferença no custo inicial de R\$604,50 entre um sistema utilizando lâmpadas fluorescentes.

Entretanto, a economia gerada em energia pela adoção do sistema de iluminação utilizando lâmpadas *LED* e o controle automatizado no acionamento até o 8º mês é de R\$ 658,71, o que já compensa os custos da diferença no investimento. No período de 24 meses, ilustrado no gráfico acima, a economia de energia elétrica total em comparação ao sistema convencional, seria de 2.473,92

kWh, equivalente a R\$ 1.979,14, que o corresponderia à uma economia de R\$ 1.038,00 considerando o investimento inicial da instalação.

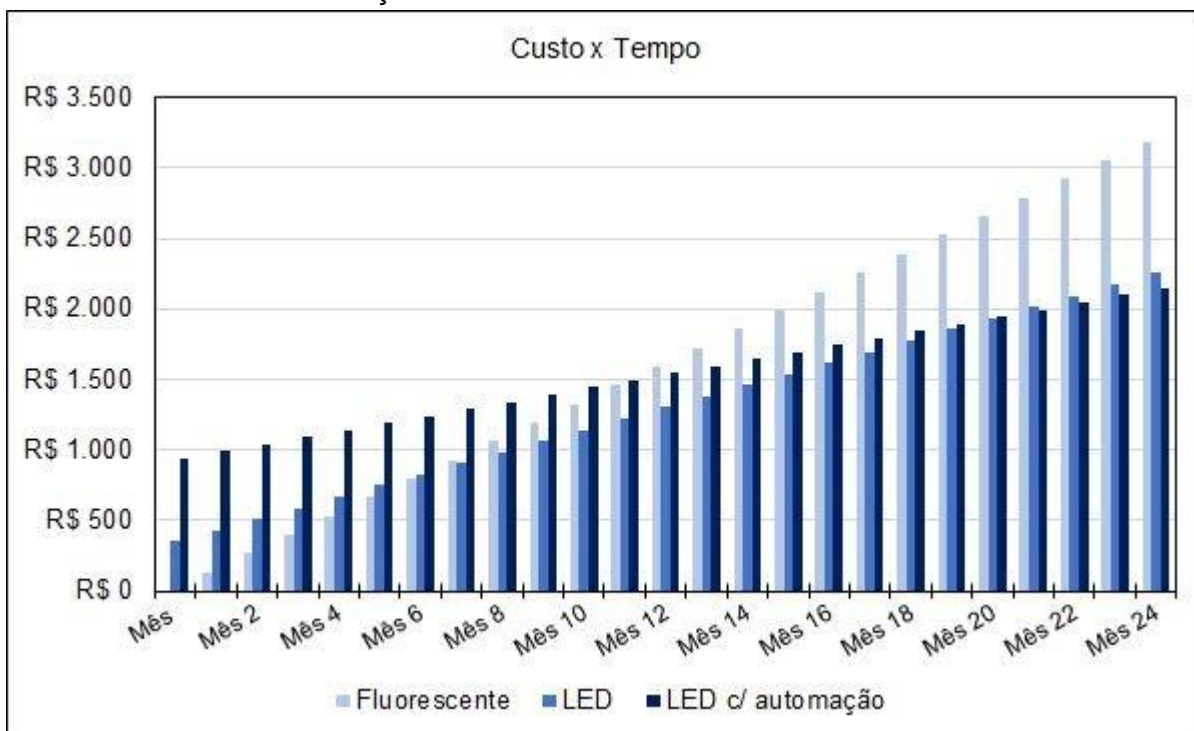
Contudo, é importante considerar que, com vida útil estimada em 40.000 horas pelo fabricante, as novas lâmpadas durariam um período superior a 117 meses, o que corresponde a quase 10 anos de uso diário, conforme o período programado. Se comparado ao sistema de iluminação antigo, que utilizava lâmpadas fluorescentes, o retorno do investimento, já considerando os custos iniciais, fica estimado em R\$9.435,98. Para chegar a este valor, foram considerados os dados da Tabela 9. Além do custo da energia, neste período foi considerada uma troca das lâmpadas e uma troca de reatores, devido à sua vida útil ser inferior a vida útil da lâmpada *LED*. Em nenhum dos casos foi considerado o custo de mão-de-obra necessário.

4.5.2 Implementação em um Sistema Existente

Conforme análise anterior, em instalações novas, o uso de lâmpadas fluorescentes não se mostra vantajoso do ponto de vista econômico, tão pouco do ponto de vista energético. Logo, se torna mais relevante a análise dos aspectos econômicos de uma intervenção realizada em um sistema de iluminação existente, bem como realizado neste trabalho de monografia.

Lembrando que, para realizar a análise em relação a um sistema existente, não foi levado em consideração os custos iniciais do que já estava instalado, contabilizando apenas os custos dos sistemas propostos. Com isso o tempo de retorno do investimento foi maior, pois neste caso não houve uma comparação com o custo inicial. Contudo, mesmo tendo um *payback* mais estendido em relação à análise anterior, ainda se considera curto, considerando a vida útil das lâmpadas. O Gráfico 8 abaixo, demonstra os custos relacionados às intervenções, e os impactos no custo de energia elétrica ao longo do período de dois anos.

Figura 40 - Gráfico de análise dos aspectos econômicos nas intervenções realizadas em um sistema de iluminação.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

4.5.2.1 Comparativo de Dados entre Fluorescente e LED

Considerando a necessidade de realizar um *retrofit* de uma instalação, ou seja, atualizar um sistema de iluminação existente, se contabiliza apenas os gastos com as novas lâmpadas. Para o caso em questão, o custo inicial para realizar a troca de todas as lâmpadas que compõem o sistema de iluminação foi de R\$ 352,00, de acordo com os dados disponíveis na Tabela 9, não considerando a mão-de-obra para a instalação.

Como pôde ser visto na Figura 40, mesmo partindo de um custo inicial maior, em pouco tempo a redução mensal do consumo foi suficiente para compensar os gastos com o lâmpadas de diodo. Nos primeiros 8 meses instalados, a redução da energia elétrica consumida pelo sistema de iluminação do espaço seria de 468,51 kWh, cerca de R\$ 374,81, compensando em valor do investimento, com saldo positivo de R\$ 22,81.

4.5.2.2 Comparativo de Dados entre Fluorescente e LED com Automação

O comparativo entre os dados obtidos dos sistemas utilizando lâmpadas fluorescentes e lâmpadas LED com acionamento automatizado, é o que traz o maior diferencial entre o consumo energético e o custo inicial. Para a implementação do sistema utilizando as novas lâmpadas e o controle, foram investidos um total de R\$ 940,50, o que parece ser um custo alto, quando se pensa em iluminar um espaço. Porém, em relação ao sistema de iluminação antigo, este valor corresponde a praticamente 60% do que é gasto ao longo de um ano em energia elétrica.

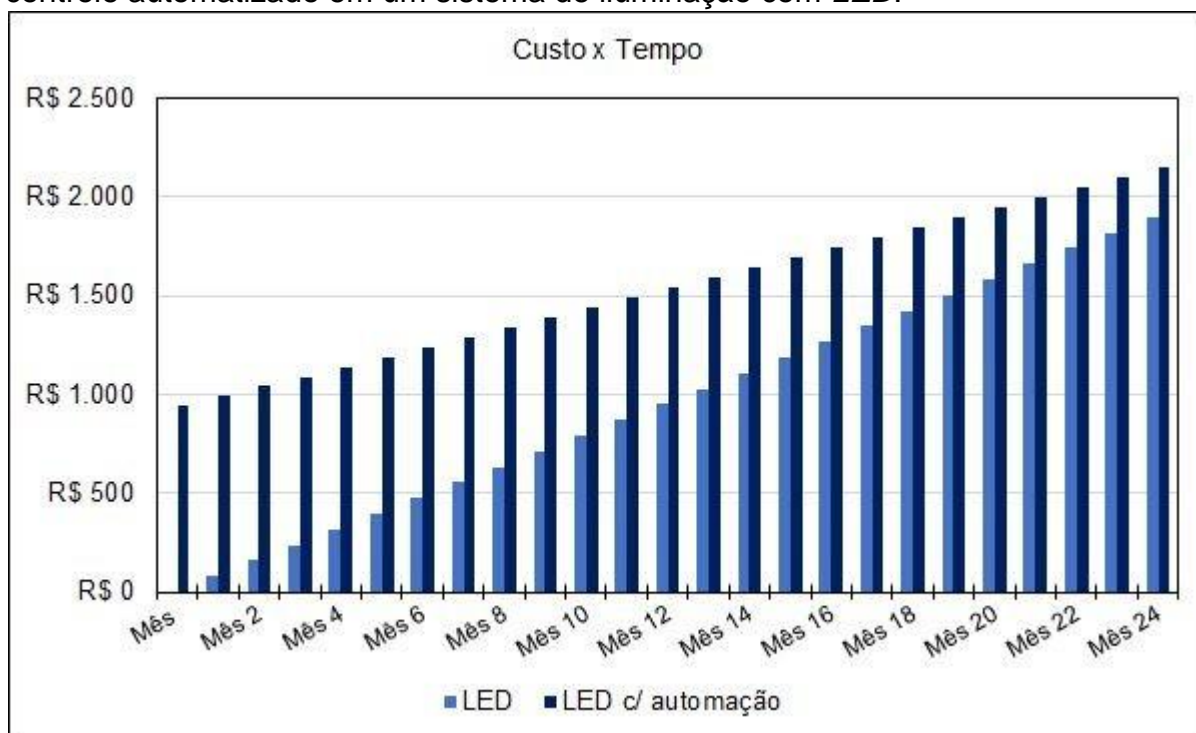
Ainda considerando o período de um ano, a economia de energia gerada a partir da adoção do novo sistema de chaveamento das luminárias e das novas lâmpadas, em comparação ao sistema antigo, foi de 838,80 kWh, correspondente à R\$ 989,57, o que já compensaria os custos de instalação, tendo um *payback* de 1 ano para a implementação do sistema proposto. Até o final do período ilustrado no gráfico acima, o novo sistema apresenta economia de energia de 2.473,92 kW/h, em torno de R\$ 1.979,14, considerando os dados da Tabela 9, o que corresponde a uma economia de R\$ 1.038.64, ou seja, superior ao investimento inicial de implementação do sistema.

4.5.3 Comparativo de Dados entre LED e LED com Automação

Por fim, analisou-se o tempo de retorno do investimento de um sistema de iluminação com lâmpadas LED e acionamento convencional, comparando-se à utilização de um sistema de acionamento automatizado. No caso em questão, pode-se de fato observar o impacto da implementação do controle sobre o consumo de energia elétrica do sistema de iluminação, e a redução do desperdício de energia ao optar por sistemas sem a possibilidade de variação da quantidade de lâmpadas acesas.

Para este caso, se fosse considerada uma instalação em um sistema novo, ou em um sistema existente com lâmpadas fluorescentes, a diferença no investimento inicial seria a mesma, pois ambas contabilizam os custos das lâmpadas de *LED*. Esta diferença seria o valor da implementação do sistema de automação. Este gasto, poderia ser considerado ainda, como o custo inicial de uma outra situação hipotética: a de uma sala com lâmpadas *LED* já instaladas no local, onde deseja-se ter automação. Ele representa os gastos com materiais empregados no circuito de controle do acionamento, que foram de R\$ 588,50. Vale ressaltar que os custos com mão-de-obra não foram contabilizados nesta análise.

Figura 41 - Gráfico de análise dos aspectos econômicos na implementação do controle automatizado em um sistema de iluminação com *LED*.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Conforme ilustra o gráfico abaixo, somente no trigésimo terceiro mês foi que o sistema de iluminação com acionamento automatizado se igualou ao sistema com acionamento convencional. Ao final do período de 2 anos, o sistema automatizado geraria a economia de energia elétrica estimada em 867,60 kW/h, equivalente a

R\$694,08, cobrindo boa parte dos custos de investimento, ainda com R\$105,58 de saldo negativo. O valor de energia elétrica economizado em 40.000 de utilização, o que corresponde à vida útil das lâmpadas, seria de aproximadamente 4.254,19 kW/h, em torno de R\$3.403,35.

A partir das análises apresentadas, já é possível observar a importância do uso da automação e da possibilidade de variação em sistemas de iluminação, para promover a eficiência energética.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho, foi realizada a implementação e análise de desempenho de um sistema de iluminação novo, contemplando um *retrofit* do existente, seguido da automatização do acionamento das luminárias, com intuito de obter maior eficiência energética e como consequência disso, gerar um melhor aproveitamento dos recursos.

A partir das análises iniciais, onde foi realizada a medição da iluminância do espaço e do consumo de energia elétrica do sistema de iluminação atual, que utilizava lâmpadas fluorescente tubulares T8 de 32 W, foi possível perceber que o sistema existente não atendia plenamente os níveis de fluxo luminoso mínimos exigidos para o ambiente, de acordo com a norma vigente. Devido à queima de lâmpadas em algumas luminárias durante o andamento do estudo, foi registrado o valor 337 Lux para um dos pontos de medição, deixando o valor médio em aproximadamente 589 Lux. Apesar disso, estimou-se que o consumo de energia mensal médio, para a utilização do local dentro das condições analisadas, chega a 165,9 kWh, o que corresponde a R\$132,72 por mês.

Com o *retrofit* da iluminação do ambiente, onde foram substituídas as lâmpadas antigas por novas, de fluxo luminoso equivalente em *LED*, com potência nominal de 18 W, observou-se uma redução significativa do consumo de energia elétrica, acompanhada de uma grande melhora nos níveis de iluminação do ambiente.

O consumo de energia elétrica teve uma redução de quase 40% em comparação aos dados anteriores, ficando com consumo estimado em 98,97 kWh por mês, enquanto que os níveis de iluminância no ambiente tiveram um aumento de aproximadamente 45%, agora atingindo média de 849 Lux. A estimativa da economia gerada em função da redução do consumo de energia elétrica para iluminar a sala chegou a R\$53,54 mensais, mesmo com níveis de iluminância superiores.

Posteriormente à instalação do sistema de controle automatizado da iluminação do espaço, que tornou possível o acionamento individual de cada luminária automaticamente, de acordo com a real necessidade, tendo como referência a luminosidade do ambiente, percebeu-se novamente uma redução do consumo de energia elétrica. Em relação à etapa anterior, onde havia sido feita apenas a troca das lâmpadas, houve uma redução no consumo energia elétrica de aproximadamente 36%, já em relação ao sistema antigo, que utilizava lâmpadas fluorescentes, houve uma redução de 62%, ficando em consumo estimado 62,82 kWh mensais. O fluxo luminoso médio do local, considerando as variações ao longo do dia, ficou em 712 Lux, tendo redução de aproximadamente 16% se comparado ao sistema sem o acionamento automatizado.

A economia de energia proveniente da implementação do sistema de controle chegou a 103,08 kWh ao mês, em comparação ao sistema antigo, e a 36,15 kWh em relação ao sistema após o *retrofit*. Estes valores representam economia mensal de R\$82,46 e R\$28,92, respectivamente. Com estes valores, estimou-se que o *payback* da implementação do sistema de controle para um sistema existente conforme o abordado neste projeto de monografia, foi de aproximadamente um ano, considerando as condições de uso e precificação da energia abordados nas análises.

Com a análise dos aspectos econômicos onde realizou-se o comparativa entre cada uma das etapas deste trabalho, é possível afirmar que tanto para instalações novas, como para a realização da troca ou manutenção em um sistema de iluminação existente, as lâmpadas fluorescentes não apresentam grandes vantagens, pois o custo se aproxima muito da sua tecnologia concorrente, e se analisando à longo prazo, as *LEDs* possuem um custo com energia muito inferior, cobrindo a diferença no preço em poucos meses.

Além disso, ao final deste projeto de monografia, através de uma análise aprofundada sobre os dados, é possível concluir que o sistema de automação é capaz de gerar um impacto positivo e, muito significativo para economia de energia elétrica em sistema de iluminação, atuando como um instrumento de grande potencial na redução do desperdício energético em edificações. Para além disso, ao longo deste trabalho foi possível comprovar a eficácia e garantia do conforto dos usuários em ambientes que contam com controle de iluminação, uma vez que o sistema atendeu os parâmetros indicados por norma, e manteve constância com poucas oscilações.

Diante do cenário contemporâneo, onde busca-se cada vez mais instrumentos de eficiência e sustentabilidade, estudos como o do presente trabalho tornam-se ainda mais importantes, e por que não essenciais, para garantir a energia do futuro das próximas gerações, e impulsionar o desenvolvimento social e tecnológico.

Como melhoria, para trabalhos futuros, será feito o desenvolvimento de um aplicativo para supervisão e controle do sistema. Apesar de funcionar de modo automático, se faz necessária uma interface de monitoramento, onde o usuário tem a possibilidade de fazer o controle da forma manual e de visualizar até mesmo alterar as variáveis de controle. Além disso, com os resultados obtidos, se torna pertinente a análise deste tipo de controle em ambientes maiores, como por exemplo, uma planta industrial.

REFERÊNCIAS

ALVES, Luiz Guilherme. **Luminária De Led Com Controle Automatizado De Luminosidade**. Trabalho de Conclusão de Curso de Tecnologia em Automação Industrial - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2013.

SANTOS, *et. al.*. **Eficiência Energética - Teoria & Prática**. 1ª Ed. Eletrobrás / PROCEL EDUCAÇÃO, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI. Itajubá, 2007.

ROSSETTI, Eugênio. **Avaliação da Eficiência Energética de um Sistema Automatizado para Controle de Iluminação Artificial da Escola Técnica Estadual Frederico Guilherme Schmidt - RS**. Trabalho de Conclusão de Curso de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada Aos Processos Produtivos - Universidade Federal de Santa Maria. Novo Hamburgo, 2017.

ALVES, Cláudio F. V.. **Plano de Eficiência Energética numa Unidade Industrial**. Relatório de Projeto de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2009.

HADDAD, Jamil. **Eficiência Energética: Fundamento e Aplicação**. 1ª Edição, Elektro - Universidade Federal de Itajubá, Excen, Fupai, Campinas, 2012.

HALLIDAY, *et. al.*. **Fundamentos de Física - Vol. 3 - Eletromagnetismo**. 8ª Edição, Jearl Walker, LTC, 2012.

LOUÇANO, Nelson R.. **Eficiência Energética em Edifícios: Gestão do Sistema de Iluminação**. Relatório de Estágio de Mestrado em Engenharia Industrial - Instituto Politécnico de Bragança, 2009.

HADDAD, Jamil. **Energia Elétrica: Conceitos, Qualidade e Tarifação**. Eletrobrás / PROCEL / PROCEL INDÚSTRIA, Rio de Janeiro, 2004.

YOUNG, *et al.*. **FÍSICA III - Eletromagnetismo**. 12ª Edição, Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2009.

HALLIDAY, *et al.*. **Fundamentos de Física - Eletromagnetismo**. 9ª Edição, Vol. 3, LTC, São Paulo, 2012.

TOLMASQUIM, *et. al.*. **Eficiência Energética na Indústria e nas Residências**. Ministério de Minas e Energia / Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2010.

SOARES, Iolando. **Eficiência Energética e a ISO 50001**. 1ª Edição, Edições Sílabo, Lisboa, 2015.

MORENO, Hilton. **Norma IEC 60364: Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Parte 8-1: Eficiência Energética Comentada Pelo Professor Hilton Moreno**. Educação Potência, São Paulo, 2015.

NUNES, André F.. **O Choque do Petróleo de 1973: Estados Unidos, OPAEP e a Segurança Energética**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SERRALHEIRO, Werther. **Apostila de Eletricidade**. 1ª Edição, CEFET/SC, Ministério da Educação, Secretaria de Educação Média e Tecnológica, Araranguá, 2008.

SOUSA, Diogo N.. **Eficiência Energética na Iluminação Pública**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.

SILVA, Rúben F. G. O.. **Estudo de Eficiência na Iluminação - Desenvolvimento de uma Ferramenta de Cálculo Luminotécnico e de Rentabilidade**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2013.

MACHADO, *et. al.* **Mineralogia Óptica**. 2010. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/petrologia/nardy/opticap3.pdf>>. Acesso em 22 de set. de 2019.

NODARI, Luis. **Luminotécnica**. 2009. Disponível em <http://joinville.ifsc.edu.br/~luis.nodari/Disciplinas/IEI/Luminotecnica/SugestaodeLeitura/Apostila_de_Instalacoes_Eletricas_parte2.pdf>. Acesso em 22 de set. de 2019.

LUZ, Jeanine M.. **Luminotécnica**. 2008. Disponível em <<https://hosting.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Livros/Luminotecnica.pdf>>. Acesso em 22 set. de 2019.

BRASIL. **Iluminação de Ambientes de Trabalho Parte 1: Interior**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2013.

RODRIGUES, Pierre. **Manual de Iluminação Eficiente**. 1ª Edição. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, 2002.

WITKOVSKI, Anderson. **Lâmpadas**. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, Pato Branco, 2004.

LIMA, *et. al.*. **O Efeito Termoiônico: Uma Nova Proposta Experimental**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 23, no. 4. São Paulo, 2001.

MARTELETO, Douglas C.. **Avaliação de Diodo Emissor de Luz (LED) Para Iluminação de Interiores**. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

BOYLESTAD, *et. al.*. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 11ª Edição, Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2013.

PEIXOTO, *et. al.*. **Sistema Microcontrolado de Acionamento e Dimerização de Carga Elétrica com Comandos Capacitivos Sensíveis ao Toque**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª Edição, Pearson Education. São Paulo, 2011.

NETO, *et. al.*. **Fundamentos de Controle de Processo**. SENAI Espírito Santo / Companhia Siderúrgica de Tubarão. Vitória, 1999.

KERSCHBAUMER, Ricardo. **Microcontroladores**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Catarinense. Luzerna, 2018.

SADIKU, *et. al.*. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5ª Edição, AMGH, Porto Alegre, 2013.

OSRAM. **Lâmpadas fluorescentes tubulares e circulares**. Disponível em <<https://www.docsity.com/pt/osram-catalogo09-10-fluorescentestubulares/4811240/>> Acesso em 27 out. de 2019.

INTRAL. **POUP-AFP-6F**. Disponível em <<https://www.intral.com.br/pt/produtos/reatores/reatores-eletronicos-para-lampadas-fluorescentes-t8t10/poup-afp---6f>>. Acesso em 27 de out. de 2019.

FREIRE, João P.. **Guia Completo: Projeto Luminotécnico Retrofit para LED**. Disponível em <<https://sxlighting.com.br/>>. Acesso em 27 de out. de 2019.

MINIPA. **Luxímetro Digital Modelo: MLM/1011**. Disponível em <http://www.minipa.com.br/images/proposta_tecnica/MLm-1011-1300-BR.pdf>. Acesso em 27 de out. 2019.

IMS. **PowerNET PQ-700 G4 Analisador da Qualidade da Energia Elétrica**. Disponível em <https://ims.ind.br/downloads/manuais/manual_PowerNET_PQ-700_G4.pdf>. Acesso em 27 de out. de 2020.

OSRAM. **Tubo LED**. Disponível em <<https://www.etcaeletrica.com.br/wp-content/uploads/2019/02/Osram-Lampada-Led-Fluor-OSRAM.pdf>>. Acesso em 27 de out. de 2019.

ATMEL. **8-bit AVR Microcontroller With 32K Bytes In-System Programmable Flash**. 2015. Disponível em <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf>. Acesso em 20 de out. 2019

JUSTEN; Álvaro. **Curso de Arduino - Apostila do Aluno**. 2011. Disponível em <[cursodearduino.com.br › apostila › apostila-rev4](http://cursodearduino.com.br/apostila/apostila-rev4)>. Acesso em 20 de out. de 2019.

COLLINS, DICTIONARY. **Software**. Disponível em <<https://www.collinsdictionary.com/pt/dictionary/english/software>>. Acesso em 15 de nov. de 2020.

COLLINS, DICTIONARY. **Hardware** Disponível em <<https://www.collinsdictionary.com/pt/dictionary/english/hardware>>. Acesso em 15 de nov. de 2020.

NOVA ELETRONICA. **O que é Shield para Arduino**. Disponível em <<http://blog.novaeletronica.com.br/o-que-e-shield-para-arduino/>>. Acesso em 27 de out. de 2019.

ARDUINO e CIA. 2014. **Dimmer Com o Módulo Sensor de Luz LDR**. Disponível em <www.arduinoecia.com.br/2014/08/19>. Acesso em 27 de out. 2019.

OXFORD, LEXICO. **Datasheet**. Disponível em <https://www.lexico.com/definition/data_sheet>. Acesso em 15 de nov. de 2020.

MONQUEIRO; Júlio C. B.. **Manual para Análise de Faturas de Energia Elétrica (Média/Alta Tensão)**. Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2018.

COLLINS, DICTIONARY. **Setpoint**. Disponível em <<https://www.collinsdictionary.com/pt/dictionary/english/setpoint>>. Acesso em 15 de nov. de 2020.

OXFORD, LEXICO. **Payback**. Disponível em <<https://www.lexico.com/definition/payback>>. Acesso em 15 de nov. de 2020.

.

.

APÊNDICES E ANEXOS

ANEXO A - TRECHO DA NORMA ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013

ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013

Tipo de ambiente, tarefa ou atividade	\overline{E}_m lux	UGR_L	R_a	Observações
Sala de leitura	500	19	80	Recomenda-se que a iluminação seja controlável.
Quadro negro	500	19	80	Prevenir reflexões especulares.
Mesa de demonstração	500	19	80	Em salas de leitura 750 lux.
Salas de arte e artesanato	500	19	80	
Salas de arte em escolas de arte	750	19	90	$T_{cp} > 5\,000\text{ K}$.
Salas de desenho técnico	750	16	80	
Salas de aplicação e laboratórios	500	19	80	
Oficina de ensino	500	19	80	
Salas de ensino de música	300	19	80	
Salas de ensino de computador	500	19	80	Para trabalho com VDT, ver 4.10.
Laboratório linguístico	300	19	80	
Salas de preparação e oficinas	500	22	80	
Salas comuns de estudantes e salas de reunião	200	22	80	
Salas dos professores	300	22	80	
Salas de esportes, ginásios e piscinas	300	22	80	Para as instalações de acesso público, ver CIE 58 – 1983 e CIE 62 – 1984.

ANEXO B - ALGORITMO DE CONTROLE DA ILUMINAÇÃO DESENVOLVIDO NO ARDUINO IDE 1.8.13

```
ProgramControl_v1

// Variaveis de saida para modulo de rele:
const int RelayInput1 = 6;
const int RelayInput2 = 7;
const int RelayInput3 = 8;
const int RelayInput4 = 9;
const int RelayInput5 = 10;
const int RelayInput6 = 11;
const int RelayInput7 = 12;
const int RelayInput8 = 13;

// Variaveis de entrada sensor LDR:
const int MinLux = 800;
const int MaxLux = 900;

const int SensorOut1 = 0;
const int SensorOut2 = 1;
const int SensorOut3 = 2;
const int SensorOut4 = 3;
int ValueSensor1 = 0;
int ValueSensor2 = 0;
int ValueSensor3 = 0;
int ValueSensor4 = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  pinMode(RelayInput1, OUTPUT);
  pinMode(RelayInput2, OUTPUT);
  pinMode(RelayInput3, OUTPUT);
  pinMode(RelayInput4, OUTPUT);
  pinMode(RelayInput5, OUTPUT);
  pinMode(RelayInput6, OUTPUT);
  pinMode(RelayInput7, OUTPUT);
  pinMode(RelayInput8, OUTPUT);
}

void loop() {
  // Leitura dos sensores:
  // Sensor 1 - controle dos reles 1 e 2:
  if(ValueSensor1 < MinLux){
    delay(5000);
    if(ValueSensor1 < MinLux){
      if(digitalRead(RelayInput1) == HIGH && digitalRead(RelayInput2) == HIGH){
        digitalWrite(RelayInput1, LOW);
      }
      else if(digitalRead(RelayInput1) == LOW && digitalRead(RelayInput2) == HIGH){
        digitalWrite(RelayInput2, LOW);
      }
    }
  }
}
```

ANEXO B - ALGORITMO DE CONTROLE DA ILUMINAÇÃO DESENVOLVIDO NO ARDUINO IDE 1.8.13

```
}
else {
    digitalWrite(RelayInput1, LOW);
    digitalWrite(RelayInput2, LOW);
}
}
}
if (ValueSensor1 > MaxLux){
    delay(5000);
    if (ValueSensor1 > MaxLux){
        if(digitalRead(RelayInput1) == LOW && digitalRead(RelayInput2) == LOW){
            digitalWrite(RelayInput2, HIGH);
        }
        else if(digitalRead(RelayInput1) == LOW && digitalRead(RelayInput2) == HIGH){
            digitalWrite(RelayInput1, HIGH);
        }
        else {
            digitalWrite(RelayInput1, HIGH);
            digitalWrite(RelayInput2, HIGH);
        }
    }
}

// Sensor 2 - controle dos reles 3 e 4:
if(ValueSensor2 < MinLux){
    delay(5000);
    if(ValueSensor2 < MinLux){
        if(digitalRead(RelayInput3) == HIGH && digitalRead(RelayInput4) == HIGH){
            digitalWrite(RelayInput4, LOW);
        }
        else if(digitalRead(RelayInput4) == LOW && digitalRead(RelayInput3) == HIGH){
            digitalWrite(RelayInput3, LOW);
        }
        else{
            digitalWrite(RelayInput3, LOW);
            digitalWrite(RelayInput4, LOW);
        }
    }
}
if (ValueSensor2 > MaxLux){
    delay(5000);
    if (ValueSensor2 > MaxLux){
        if(digitalRead(RelayInput1) == LOW && digitalRead(RelayInput2) == LOW){
            digitalWrite(RelayInput3, HIGH);
        }
        else if(digitalRead(RelayInput1) == LOW && digitalRead(RelayInput2) == HIGH){
            digitalWrite(RelayInput4, HIGH);
        }
        else {
            digitalWrite(RelayInput3, HIGH);
        }
    }
}
```

ANEXO B - ALGORITMO DE CONTROLE DA ILUMINAÇÃO DESENVOLVIDO NO ARDUINO IDE 1.8.13

```
        digitalWrite(RelayInput4, HIGH);
    }
}

// Sensor 3 - controle dos reles 5 e 6:
if(ValueSensor3 < MinLux){
    delay(5000);
    if(ValueSensor3 < MinLux){
        if(digitalRead(RelayInput5) == HIGH && digitalRead(RelayInput6) == HIGH){
            digitalWrite(RelayInput5, LOW);
        }
        else if(digitalRead(RelayInput5) == LOW && digitalRead(RelayInput6) == HIGH){
            digitalWrite(RelayInput6, LOW);
        }
        else {
            digitalWrite(RelayInput5, LOW);
            digitalWrite(RelayInput6, LOW);
        }
    }
}

if (ValueSensor3 > MaxLux){
    delay(5000);
    if (ValueSensor3 > MaxLux){
        if(digitalRead(RelayInput1) == LOW && digitalRead(RelayInput2) == LOW){
            digitalWrite(RelayInput6, HIGH);
        }
        else if(digitalRead(RelayInput1) == LOW && digitalRead(RelayInput2) == HIGH){
            digitalWrite(RelayInput5, HIGH);
        }
        else {
            digitalWrite(RelayInput5, HIGH);
            digitalWrite(RelayInput6, HIGH);
        }
    }
}

// Sensor 4 - controle dos reles 7 e 8:
if(ValueSensor4 < MinLux){
    delay(5000);
    if(ValueSensor4 < MinLux){
        if(digitalRead(RelayInput7) == HIGH && digitalRead(RelayInput8) == HIGH){
            digitalWrite(RelayInput8, LOW);
        }
        else if(digitalRead(RelayInput8) == LOW && digitalRead(RelayInput7) == HIGH){
            digitalWrite(RelayInput7, LOW);
        }
        else {
            digitalWrite(RelayInput7, LOW);
        }
    }
}
```

ANEXO B - ALGORITMO DE CONTROLE DA ILUMINAÇÃO DESENVOLVIDO NO ARDUINO IDE 1.8.13

```
        digitalWrite(RelayInput8, LOW);
    }
}
}|

if (ValueSensor4 > MaxLux){
    delay(5000);
    if (ValueSensor4 > MaxLux){
        if(digitalRead(RelayInput1) == LOW && digitalRead(RelayInput2) == LOW){
            digitalWrite(RelayInput7, HIGH);
        }
        else if(digitalRead(RelayInput1) == LOW && digitalRead(RelayInput2) == HIGH){
            digitalWrite(RelayInput8, HIGH);
        }
        else {
            digitalWrite(RelayInput8, HIGH);
        }
    }
}
delay(1000);
}
```



UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09